HOSSZÚ ÉLETTARTAMÚ BETONOK KÖTŐANYAGÁNAK* KIVÁLASZTÁSA KOR-TÉNYEZŐ, KÉMIAI ÉS POROZIMETRIAI ADATOK ALAPJÁN

*** értsd alatta: cementjének**

Kopecskó Katalin – Laczkó László – SPRÁNITZ FERENC – Balázs L. György

A vasbetonszerkezetek tartósságának javítása céljából a második generációs EC-2 szabványt a használati élettartam mérnöki becslésével is kiegészítik. Az anyagoldali ellenállás számszerűsítésében kiemelt jelentőséget kapnak a transzportfolyamatokat, az ion- és molekulavándorlást vizsgáló eljárások. Az ionok diffúziójának vizsgálata az acélbetétek korróziós kockázata tervezéséhez ad tájékoztatást például a széndioxid (karbonátosodás), valamint a kloridion diffúziójának vizsgálata révén. A hosszú időtartamú kloridion-diffúziós folyamatok gyorsítására kidolgozott módszerrel (EN 12390-18 szabvány) kloridmigrációs vizsgálatokat végeztek a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Laboratóriumában, valamint a SZIKKTI Labor Kft-ben. A cikkben összegezzük és értékeljük a két laboratórium egy-, két- és háromösszetevős kötőanyagokon mért vizsgálati eredményeit. A porozimetriai és kémiai összetételi eredmények segítségével keresünk magyarázatot a kloridmigráció mérési eredményeiben mutatkozó nagy eltérésekre.

Kulcsszavak: Tervezési élettartam, használati élettartam, kloridmigrációs együttható, kor-tényező, pórusméret-eloszlás, reakcióképes összetevők, új cement- és betonszabványok

MEGJEGYZÉS: E cikk "kötőanyag" szaván "cement" értendő.
A kötőanyag e cikkben használtnál tágabb fogalom.

1. Bevezetés

A beton- és vasbetonszerkezetek fenntarthatóságát nagymértékben befolyásolja a tartósságuk. A tartósság lehetőségének növelése jelenti a legésszerűbb megközelítést a megfelelően hosszú időtartamú teljesítőképességhez. Jelen cikk e lehetőséghez kapcsolódó egyes anyagtani vizsgálatok ismertetésével kíván hozzájárulni a jövőben majd történelminek tekintett egyes építményeink várható élettartamának növeléséhez.

A vasbetonszerkezetek megjelenésével egyidős az a kérdés, hogy milyen tartósságra lehet számítani ezek kivitelezésekor, illetve „Hány évig áll majd ez a híd?”. Nem egyszerű erre a kérdésre mérnöki megalapozottsággal válaszolni. Különösen időszerűvé vált ez a kérdés napjaink környezetvédelmi forgatókönyvei tükrében (lásd "bölcsőtől a kapuig" vagy "bölcsőtől a sírig" forgatókönyveket a 2013/179/EU bizottsági ajánlásban).

Nem vitás, hogy a légkörbe kibocsátott CO_2 mennyiségét csökkenteni kell, és ennek egyik lehetséges módja a CEM I cementfajta használatának csökkentése. Vegyük azonban figyelembe, hogy a különböző cementkiegészítő anyagok – amelyek lehetővé teszik a klinkertartalom csökkentését – olyan eltérő fizikai-kémiai tulajdonságokat mutatnak, hogy egyes esetekben túlzott mértékben növelhetik meg a szükséges betonfedést, ha a vasbetont például a karbonátosodás

okozta acélbetétkorrózió vagy kloridtámadás éri. Ezért a kiegészítőanyagokat nemcsak a cement nyomószilárdságára gyakorolt hatásuk, hanem a tartósságra gyakorolt hatásuk, azaz a kémiai ("genetikai") tulajdonságaik alapján is indokolt megkülönböztetni.

A kötőanyagok kémiai összetételét mind a jelenleg érvényes cement- és betonszabványok, mind a betonra vonatkozó új szabványtervezet figyelmen kívül hagyja.

A kloridoknak kitett vasbetonszerkezetek esetében vizsgálataink szerint ésszerűtlennek tűnik olyan kötőanyag használata, amelynek kémiai összetétele túlságosan alacsony reakcióképes SiO_2+Al_2O_3-tartalmat jelez ($\leq$ 25%). Ha a szabványok lehetővé teszik, hogy bármilyen kémiai összetételű kötőanyagot besoroljanak a kloridállósági osztályokba, akkor ez valószínűleg több kárt okoz, mint hasznot.

Nem véletlen, hogy a tartóssági problémák egyidősek a vasbeton használatának elterjedésével. Már a kezdetektől az a tervezési felfogásmód tűnt észszerűnek, hogy a szerkezetek teherbírása, használhatósága szempontjából legfontosabb tulajdonságot, a nyomószilárdságot hozzák kapcsolatba a tartóssággal, illetve minden egyéb olyan tulajdonsággal, ami az adott esetben szükségesnek mutatkozik (például vízzáróság, fagyállóság, kopásállóság stb.). Az elsődleges szempontnak tekintett nyomószilárdság viszonylag könnyen, egyszerű módszerekkel meghatározható. Mindamellett az elmúlt száz év egymást követő tervezési előírásai egyre nagyobb betonfedéseket írtak elő az azonos veszélyeztetettségű vasbetonszerkezetekre. Ez annak a tapasztalatnak tulajdonítható, hogy a vasbetonszerkezetekben az acélkorróziót nem lehet teljesen kiküszöbölni, legfeljebb csak késleltetni.

A betonra, mint porózus anyagra érvényes szabály, hogy minél kisebb a porozitása, annál nagyobb a porózus anyag szilárdsága (*Balázs*, 1987). A beton pórusszerkezete, korrózióállósága és tartóssága között is szoros kapcsolat áll fenn (*Ujhelyi*, 2005). Ugyanakkor a beton korróziós vizsgálatai során nem találtak általános összefüggést sem a porozitás-áteresztőképesség, sem a szilárdság-áteresztőképesség összefüggésében (*Nehdi*, 2007). A beton mezostruktúrája jellemzői közül kapcsolatot találtak a pórusméret-eloszlás és az áteresztőképesség között (*Collins*, 2000; *Novák*, 2004).

A tartóssággal kapcsolatos megoldandó kérdések és megoldási lehetőségek ismeretében a szabványalkotó szakemberek már a legelső európai betonszabvány (prEN 206-1:1985) bevezetőjében megemlítik: *„A határértékek elvének alternatívájaként folyamatban van a teljesítményalapú elvek kidolgozása”*; azonban az említett *"teljesítményalapú elvek"* mérnöki számszerűsítése valamint a megoldási lehetőségek kidolgozása további 30 évet, és szabványosításuk 40 évet vett igénybe.

A mérnökök egyetértenek abban, hogy tervezési és kivitelezési gyakorlatot nem alapozhatjuk 50 vagy 100 éves tapasztalatokra, mivel az utóbbi években az anyagok és a gyakorlat is jelentősen változott. Ezért a feltételezéseinket extrapolálni kell rövid- és középtávú tapasztalatok alapján. Az ilyen extrapolációk elvégzéséhez időfüggő modellekre van szükség. A *fib* és az ISO szervezetek olyan, a mai műszaki ismereteink szerinti természeti (fizikai-kémiai) törvényeken alapuló időfüggő modelleket alkottak a környezeti hatásokra, amelyeket nemzetközileg elfogadtak. A betonba való kloridbehatolás modelljét, például *Fick* II. mód. diffúziós törvénye alapján részletezi a *fib* Bulletin 34 és az ISO 16204 szabvány.

A CEN szabványelőkészítő közös munkacsoport 10 évvel ezelőtti dokumentumaiban (CEN JWG TC250/104; *Greve-Dierfeld – Gehlen*, 2014; *Leivestad*, 2014a; 2014b; *Helland*, 2016) az erőtani tervezést kiegészítették olyan, matematikai-fizikai modelleken alapuló anyagtervezéssel, amely mérnöki számításokkal vette figyelembe mind a várható környezeti hatásokat (például karbonátosodás, fagyás, kloridok), mind a beton anyagának az ellenállását.

E 10 évvel ezelőtt kidolgozott új EN 206 szabvány felfogásmódja időközben némiképp módosult. Így a jelenlegi szabványtervezetek (CEN/TC 250/SC 2 „Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése" és EN 206-100 DRAFT 14) az úgynevezett "visszaszámítási" *(„back-calculation")* módszert alkalmazzák. Ez azt jelenti, hogy a fiatal (28-90 napos) betonon elérendő anyagoldali ellenállási értékeket írnak elő az 50 éves tervezési élettartam és adott környezeti hatás esetére.

Az anyagoldali ellenállás számszerűsítésében kiemelt jelentőségűek azok az eljárások, szabványosított vizsgálati módszerek, amelyekkel a beton pórusrendszerében végbemenő transzportfolyamatok, az ion- és molekulavándorlások mérhetővé és számszerűsíthetővé tehetők (*fib* Bulletin 34, 2006; *fib* Bulletin 76, 2015; *Zaid A. A. – Kopecskó*, 2019; *Kopecskó* és *Mlinárik*, 2022).

Az ionok diffúziójának vizsgálata az acélbetétek korróziója szempontjából tájékoztatást ad a tervezéshez például a széndioxid (karbonátosodás), valamint a kloridionok diffúziójának becslése vagy vizsgálata révén. Régóta ismert, hogy a diffúzió mérsékelhető a beton utókezelésének a javításával, kiegészítő anyagokkal, tömítő adalékszerekkel, felületi bevonatokkal és egyes impregnálószerekkel, de ezek hatékonyságát a közelmúltig nehéz volt kielégítő módon értékelni, illetve a tervezési élettartam számításához illeszteni, a megfelelő vizsgálati szabványok hiányában.

E cikkben összefoglaljuk és értékeljük azokat a laboratóriumi méréseket, amelyek elősegíthetik mind a cementgyártók termékfejlesztését, mind a szabványalkotó szakemberek és a betontechnológusok munkáját az új cementtípusok alkalmazhatóságával kapcsolatban a vasbetonszerkezetek kloridtámadása esetére.

Bemutatunk néhány olyan kötőanyag-társítást is, amelyekkel kis betonfedés esetére is becsülhető a hosszú (akár szokatlanul hosszú) tervezési élettartam.

2. Felfogásmód

Mivel infrastrukturális betonszerkezeteinkben a kloridok okozzák a leggyorsabb romlást, ezért a tervezési élettartamuk mérnöki becsléséhez célszerű ismerni az egyes kötőanyagok és a kloridionok vándorlási sebessége közötti összefüggést.

Napjainkban számos új cementtípus és kiegészítőanyag jelenik meg; ezek hosszútávú ellenállására megfelelő mérnöki becsléseket kell adnunk. Sok ismerettel rendelkezünk a beton makrostruktúrális jellemzőiről (még az új cementtípusok esetében is), de keveset tudunk a mezo- és mikrostruktúra jellemzőivel való összefüggéseiről, amelyek felelősek lehetnek például a vízben oldott ionok és molekulák diffúziójának sebességéért. Ezért nem csak kloridmigrációs vizsgálatokat, hanem higany besajtolásos porozitás (MIP) méréseket is végeztünk, hogy megismerjük a különböző cementkövek mezostruktúrájában az átjárható pórusrendszert.

Az új betonos szabványtervezetnek megfelelően megmértük a kloridmigrációs együtthatókat, és az úgynevezett "visszaszámítási" módszerrel meghatároztuk 31 kötőanyagtípus kloridállósági osztályát (XRDS). Ezeket a kötőanyagfüggő ellenállás-oldali XRDS osztályokat kell összevetni a hatásoldali környezeti osztályokkal (XD) és az ezekben az osztályokban szükséges c_{min} betonfedésekkel.

Meghatároztuk továbbá egyes kötőanyagok reakcióképes kémiai összetevőit, amelyek a víztartalommal együtt döntően befolyásolják a cementkő mikro- és mezostruktúráját. A porozimetriai és kémiai összetételi eredmények segítségével *magyarázatot kerestünk a cementfajták szokatlanul eltérő kloridmigrációs mérési eredményeire*. A közölt mérési eredmények átlagértékeket jelölnek, a szórást és az eloszlás típusát nem határoztuk meg.

2.1. Az $x = 0{,}4$ kötőanyagok/keverékek összetétele

A próbatestek kötőanyagainak felsorolását és megnevezését az *1. táblázat* részletezi. A vizsgálatokhoz összesen 5 féle cementet, 4 féle metakaolint (továbbiakban MK1, 2, 3 és 4), valamint egy-egy szűrt feketekőszén pernyét (továbbiakban UFFA), őrölt granulált kohósalakot (továbbiakban GGBS), szilikaport (SF) és mészkőlisztet (LS) használtunk.

A BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék laboratóriumában és a SZIKKTI Labor Kft-ben végeztük az EN 12390-18 szabvány szerinti 2 és 3 éves kloridmigrációs méréseket a 31 féle egy-, két- és háromösszetevős kötőanyaggal. A próbatestek a cementszabvány szerinti habarcsból készültek, azzal a különbséggel, hogy a víz-kötőanyag tényező $x = 0{,}4$ volt.

Minthogy a higanyporozimetriával vizsgálható anyagmennyiség mindössze 2-3 cm^3, méréstechnikai okokból célszerűbbnek találtuk a porozimetriai vizsgálatokat cementköveken, mint cementhabarcsokon elvégezni.

Mivel a tömegi porozitás helyett megbízhatóbb és fontosabb a térfogati porozitás ismerete, a mért adatok helyes értelmezése érdekében a porozimétérek adatfeldolgozó szoftvere által megadott tömegi porozitás {(pórus, cm^3)/(cementkő, gramm)} helyett az ábrákon a sűrűséggel korrigált térfogati porozitást {(pórus, cm^3)/(cementkő, cm^3)} tüntettük fel.

Különböző korokban megmértük a kezdeti kloridmigrációs együtthatót, majd ezekből a 2 és 3 évig tartó laboratóriumi mérésekből regressziós elemzéssel határoztuk meg a kötőanyag-specifikus kor-tényezőt. Néhány esetben igen kedvező kloridmigrációs eredmények adódtak, ezért a kutatást 2020-tól kiterjesztettük az x = 0,5 víz-kötőanyag tényezőjű szabványhabarcsokra is, amelyek eredményeit később ismertetjük.

Előzetesen érdemes megemlíteni, hogy a kísérletek sorába bevont némely hazai trasszal kapott kor-tényező a nagyobb víz-kötőanyag tényező ellenére is elérte vagy fölülmúlta a jelen cikkben bemutatott legjobb kloridállósági eredményeket. *Célszerűnek mutatkozik a jelentős hazai ásványi vagyont képező alumínium-szilikátoknak a vasbetonok tartósságjavítására irányuló további célzott kutatása és ezek ipari hasznosítása.*

A vizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy a kor-tényező nemcsak a kötőanyag típusától, hanem a víz-kötőanyag tényezőtől is függ. Ezt azért kell megemlíteni, mert a kötőanyagtípusokra megadott kor-tényező az EN 206-100 DRAFT 14 szabványtervezetben állandó értékként jelenik meg.

A vizsgálatok lehetőséget nyújtottak az egyes cementfajták, valamint kiegészítőanyagok kloridmigrációra gyakorolt hatása elemzésére. A kloridmigráción kívül a kötőanyagkeverékeket a kémiai ellenállás (*Kopecskó* et al., 2020), a kémiai és reakcióképes összetevők, a cementhidratáció, a fázisösszetétel, a morfológia és a porozitás szempontjából is vizsgáltuk (*Laczkó* et al., 2022). A vasbetonszerkezetek tartósságának eléréséhez nélkülözhetetlen, hogy a kis víz-kötőanyag tényezőjű ($v/k \approx 0{,}4$) frissbeton jól bedolgozható és szivattyúzható legyen. A kötőanyagpépek viszkozitási vizsgálatai alapján megállapítottuk, hogy egyes, a szilárd beton kloridállóságát is kedvezően befolyásoló kiegészítőanyagok (például megfelelő adagolású szilikapor), valamint azok társításai (például granulált kohósalak + kőszénpernye) igen előnyösek lehetnek a friss beton szivattyúzhatóságára (*Spránitz* et al., 2022).

1. táblázat: Kötőanyagok/keverékek összetétele, fizikai, kémiai, pórusszerkezeti és kloridállósági jellemzői (*Kopecskó* et al. 2022)

Mixture composition water: binder:CEN sand= 0,4:1:3	type of CEM					type of SCM								chemical composition of *binders*			porosimetric data of *binders* -3 year equivalent pore sizes				chloride resistance data of *mortars*		
	"A"	"B"	"C"	II/A-S	III/A	metakaolin				fly ash	slag	silica-fume	lime-stone				total porosity "V" V%	total surface area, "A" m^2/cm^3	Ø=4V/A nm	L=A/Ø/π $\times 10^8$ m/cm^3	L/Ø $\times 10^{23}$ $1/m^3$	$D_{RCM}\ t_{(0)}$ $\times 10^{-12}$ m^2/s	Ageing factor α	XRDS class
	I 52,5R	I 42,5R	SRO 42,5	42,5N	32,5N	MK1	MK2	MK3	MK4	UFFA	GGBS	SF	LS	reactive CaO m%/b	reactive SiO_2 m%/b	Al_2O_3 m%/b							
specific gravity, g/cm^3	3,20	3,15	3,09			2,58	2,54			2,38	2,95	2,01	2,77										
Blaine surface, cm^2/g	4870	4210	4150																				
BET surface, m^2/g						10,7	13,1			1,97	1,69												
fineness number, x', µm	10,49	12,58	10,80			3,71	3,88			4,07	11,52	8,29	14,21										
medium grain size, µm	7,00	8,32	7,38			2,78	2,99			3,00	7,91	4,66	3,00										
uniformity coefficient, n	0,906	0,887	0,9622			1,28	1,40			1,199	0,977	0,635	0,747										
CEM I (A)+MK1+UFFA	0,75					0,07				0,18				46,31	24,98	10,57	20,8%	106,3	7,8	43,1	5,5	4,1	0,56	1
CEM I (A)+MK2+UFFA	0,75						0,07			0,18				46,74	23,76	10,61	20,3%	105,0	7,7	43,2	5,6	6,9	0,71	1
CEM I (A)+GGBS+UFFA	0,75									0,07	0,18			52,98	25,05	6,39	16,9%	77,9	8,7	28,7	3,3	5,6	0,65	1
CEM I (A)+GGBS	0,8										0,2			56,96	24,54	5,06	18,0%	61,1	11,8	16,5	1,4	4,5	0,16	25
CEM I (A)+MK2+LL	0,75						0,1						0,15	46,38	19,39	7,54	19,0%	70,5	10,8	20,8	1,9	6,4	0,45	3
CEM I (B)+GGBS		0,8									0,2			55,42	24,05	5,17	18,3%	48,3	15,2	10,1	0,7	4,3	0,24	10
CEM I (B)+MK1+UFFA		0,75				0,07				0,18				45,03	24,27	10,51	20,4%	73,5	11,1	21,0	1,9	1,3	0,61	0,5
CEM I (B)+MK2+UFFA		0,75					0,07			0,18				45,31	23,2	10,64	21,9%	93,4	9,4	31,7	3,4	5,8	0,80	0,5
CEM I (C)+MK1+UFFA			0,75			0,07				0,18				44,13	25,17	9,58	20,5%	72,6	11,3	20,5	1,8	4,3	0,74	0,5
CEM I (C)+MK2+UFFA			0,75				0,07			0,18				43,97	24,11	9,59	24,0%	93,7	10,2	29,1	2,9	7,4	0,88	0,5
CEM I (C)+SF			0,9									0,1		52,83	27,7	2,85	17,8%	59,5	12,0	15,8	1,3	2,4	0,36	3
CEM I (C)+GGBS			0,65								0,35			51,91	27,6	4,78	19,2%	59,0	13,0	14,4	1,1	4,7	0,34	5
CEM I (A)	1													61,31	20,47	4,35	15,9%	37,6	16,9	7,1	0,4	6,9	0,15	50
CEM I (B)		1												59,44	19,77	4,33	16,1%	25,7	25,0	3,3	0,1	7,0	0,15	50
CEM I (C)			1											59,14	20,78	3,04	17,7%	34,2	20,6	5,3	0,3	10,0	0,15	50
CEM I (C)+SF			0,95									0,05		56,19	24,11	2,94	17,4%	54,0	12,9	13,3	1	7,0	0,30	10
CEM II/A-S				1																		10,5	0,26	25
CEM III/A					1																	2,5	0,35	3
CEM I (A)+CEM III/A	0,87				0,13																	10,7	0,22	25
CEM I (C)+GGBS			0,92								0,08											10,9	0,21	25
CEM I (C)+CEM III/A			0,87		0,13																	13,1	0,21	50
CEM I (C)+MK4			0,9						0,1													3,5	0,17	10
CEM I (C)+MK4			0,83						0,17													2,0	0,17	6
CEM I (C)+MK4+SF			0,9						0,07			0,03										4	0,31	5
CEM I (C)+MK3			0,9					0,1														12,7	0,67	2
CEM I (C)+MK3			0,83					0,17														11,9	0,89	0,5
CEM I (C)+MK3+SF			0,9					0,07				0,03										8,8	0,63	1,5
CEM I (C)+UFFA			0,95							0,05												11,9	0,59	3
CEM I (C)+UFFA			0,9							0,1												13,6	0,80	1
CEM I (C)+UFFA			0,83							0,17												14,4	0,95	0,5
CEM I (C)+UFFA+SF			0,9							0,07		0,03										9,6	0,65	1,5

3. Mérési eredmények és értelmezésük

Ebben a fejezetben bemutatjuk a különböző cementeken és kötőanyagkeverékeken mért

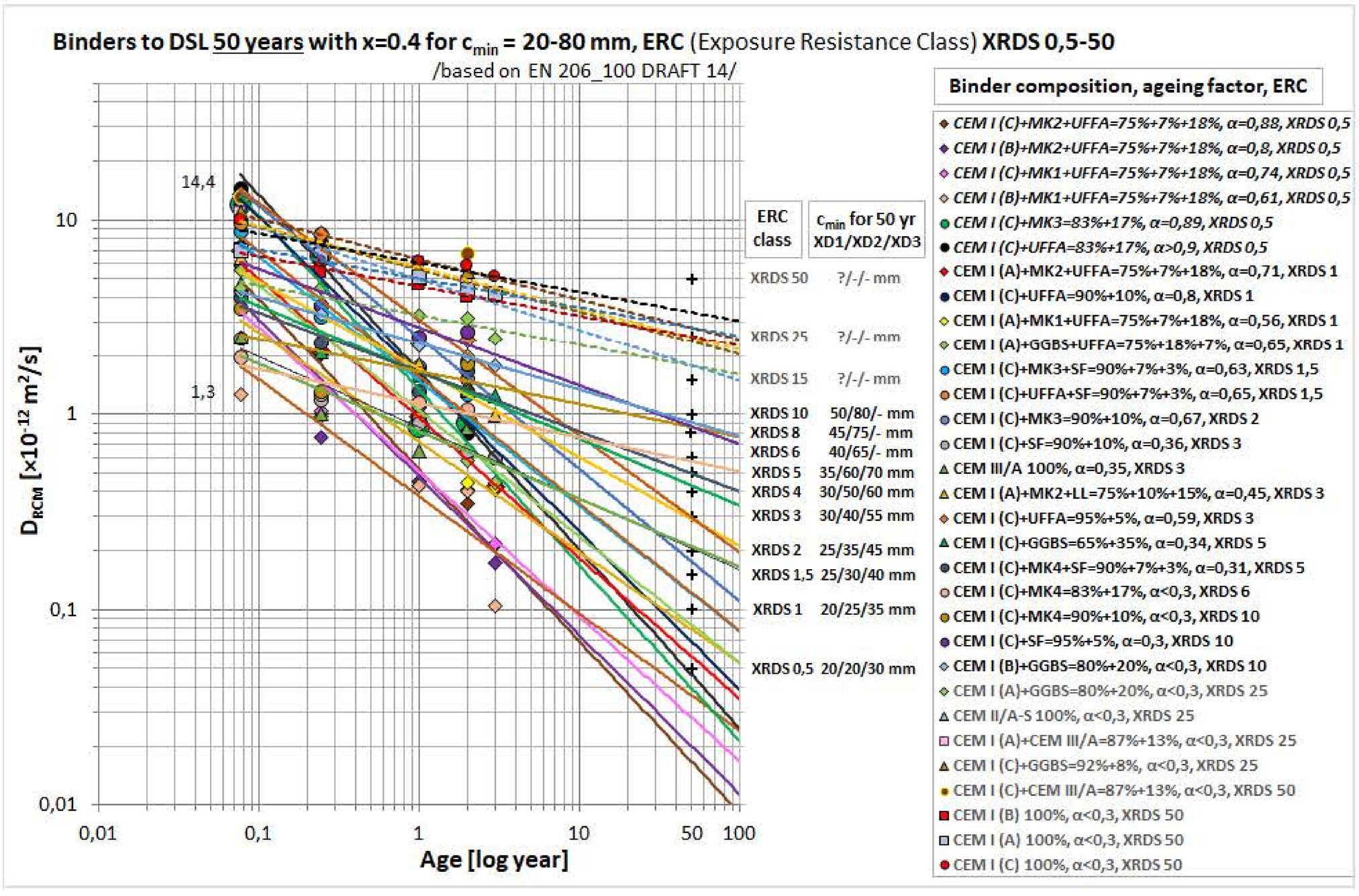
a) kloridmigrációs együtthatókat,
b) az ezekből levezetett kor-tényezőket („ageing factor”),
c) a cementkövek porozimetriai jellemzőit, valamint
d) a kötőanyagok kémiai összetételének hatását.

3.1. A kloridmigrációs együttható

Valamennyi vizsgált kötőanyagra vonatkozó mérési eredményt és a trendvonalakat az *1. ábrán* látható log-log skálájú grafikonok mutatják. A trendvonalak meredeksége (*α*- kor-tényező) jó tájékoztatást ad az egyes

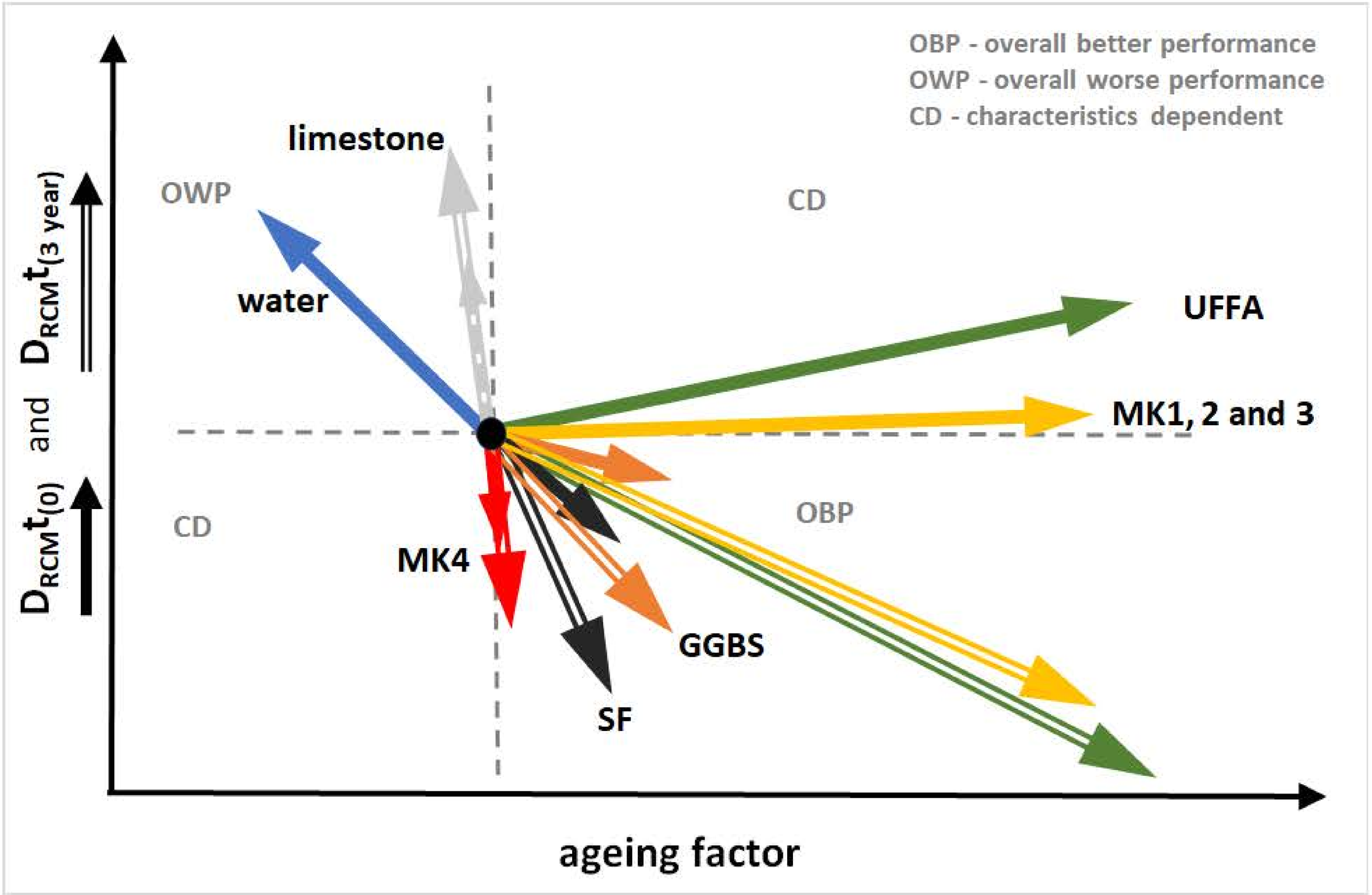
kötőanyagok kloridvándorlásra gyakorolt hatásának időbeli változásáról. Az *1. ábrán* megfigyelhető, hogy az XRDS 15-50-es ellenállási osztályba sorolt kötőanyagok (szaggatott vonallal, például a CEM I cement, a legfeljebb 20% GGBS-tartalmú kötőanyagok) még nagy betonfedés esetén sem tűnnek alkalmasnak a kloridtámadás elleni védelemre. Az XRDS 0,5 osztálynak (legnagyobb kloridállóságú osztálynak) megfelelő kötőanyag-társításokat dőlt betűvel jelöltük az *1. ábra* jobb felső részén.

Az *1. ábrából* kitűnik, hogy a nagyon gyenge kloridállóságú CEM I cement (és a kis GGBS-tartalmú, valamint a mészkőlisztes cement) ellenállóképessége is jelentősen javítható, ha a kötőanyag tartalmaz puccolán kiegészítőanyagot. Ilyen például az a 3-összetevős kötőanyag, amely 18% GGBS mellett 7% UFFA-t (Microsit-20) tartalmaz, ezáltal a kloridállóság XRDS 25-ről XRDS 1-re javult, vagy a 10% metakaolin (Metaver I) 15% mészkőliszt adagolása mellett is javította az ellenállást XRDS 50-ről XRDS 3-ra, vagy a 2-összetevős kötőanyag, amely 5% UFFA-t tartalmazott, s ezáltal a CEM I 42,5 SR0 cement kloridállósága XRDS 50-ről XRDS 3-ra javult.



1. ábra: Kötőanyag-összetétel, D_{RCM} (t), kor-tényező és ERC 50 évre, minden XRDS osztályban

A *2. ábra* szemlélteti a kötőanyag egyes alkotói adagolása növelésének hatását a kloridállóságra. A kiindulási pont: CEM I cement $x = 0,4$ víz-cement tényezővel. A *vastag vonalú nyilak jelzik a kezdeti kloridmigrációs együtthatóra* gyakorolt hatás mértékét és irányát, a *kettős vonalú nyilak pedig a 3 éves korban mért kloridmigrációs együtthatóra és a kor-tényezőre gyakorolt hatást.*



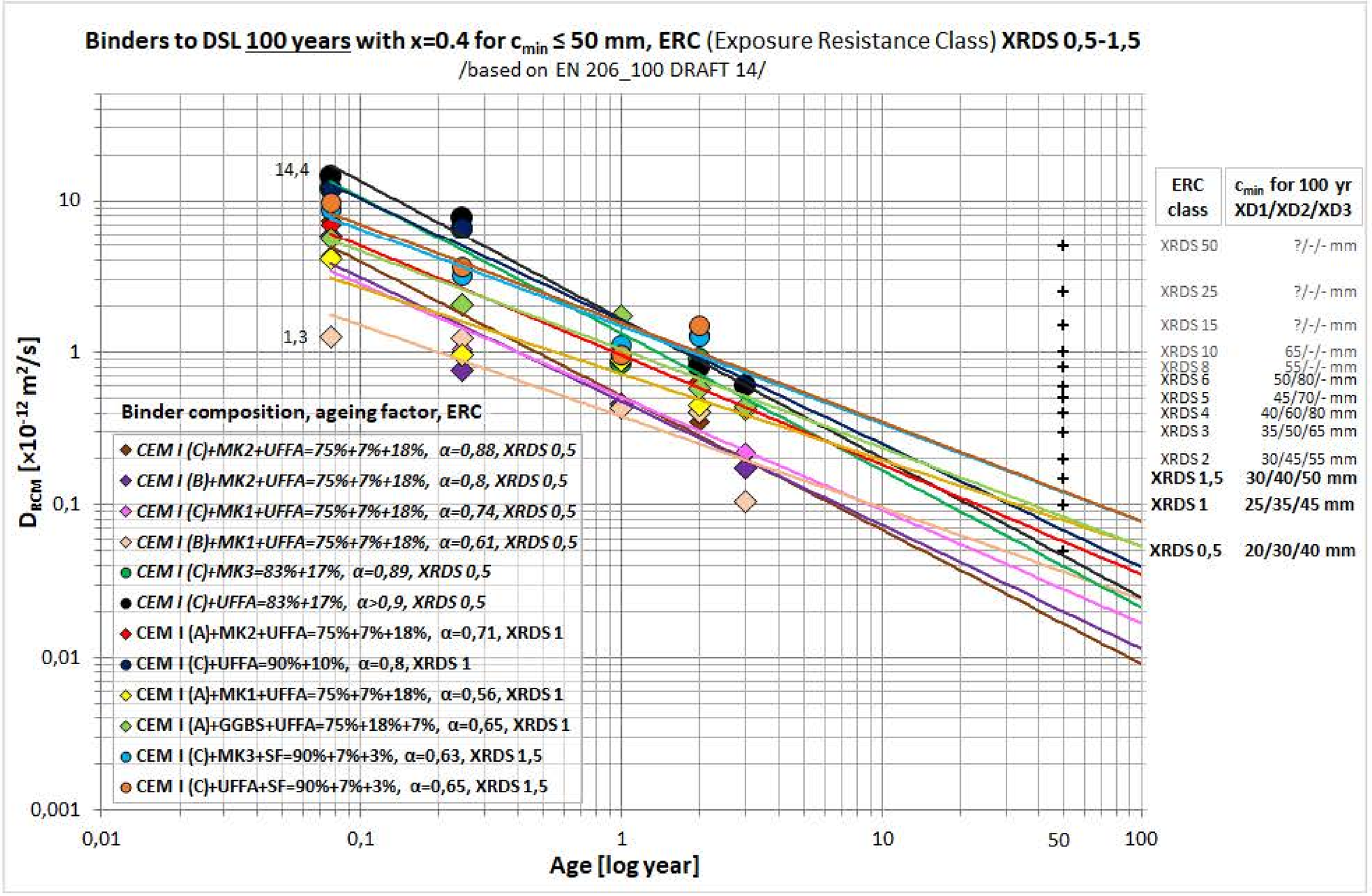
2. ábra: Összetevők hatása a kezdeti és a 3 éves kloridmigrációs együtthatóra, valamint a kor-tényezőre

A *3. ábrán* külön kiemeltük, hogy mely kötőanyag-társítások tűnnek alkalmasnak arra az esetre, amikor a tervezési élettartam 100 év, a környezeti hatásosztály a legszigorúbb (tehát XD3) és mindezek mellett a betonfedés $c_{min} \leq 50$ mm értékű.

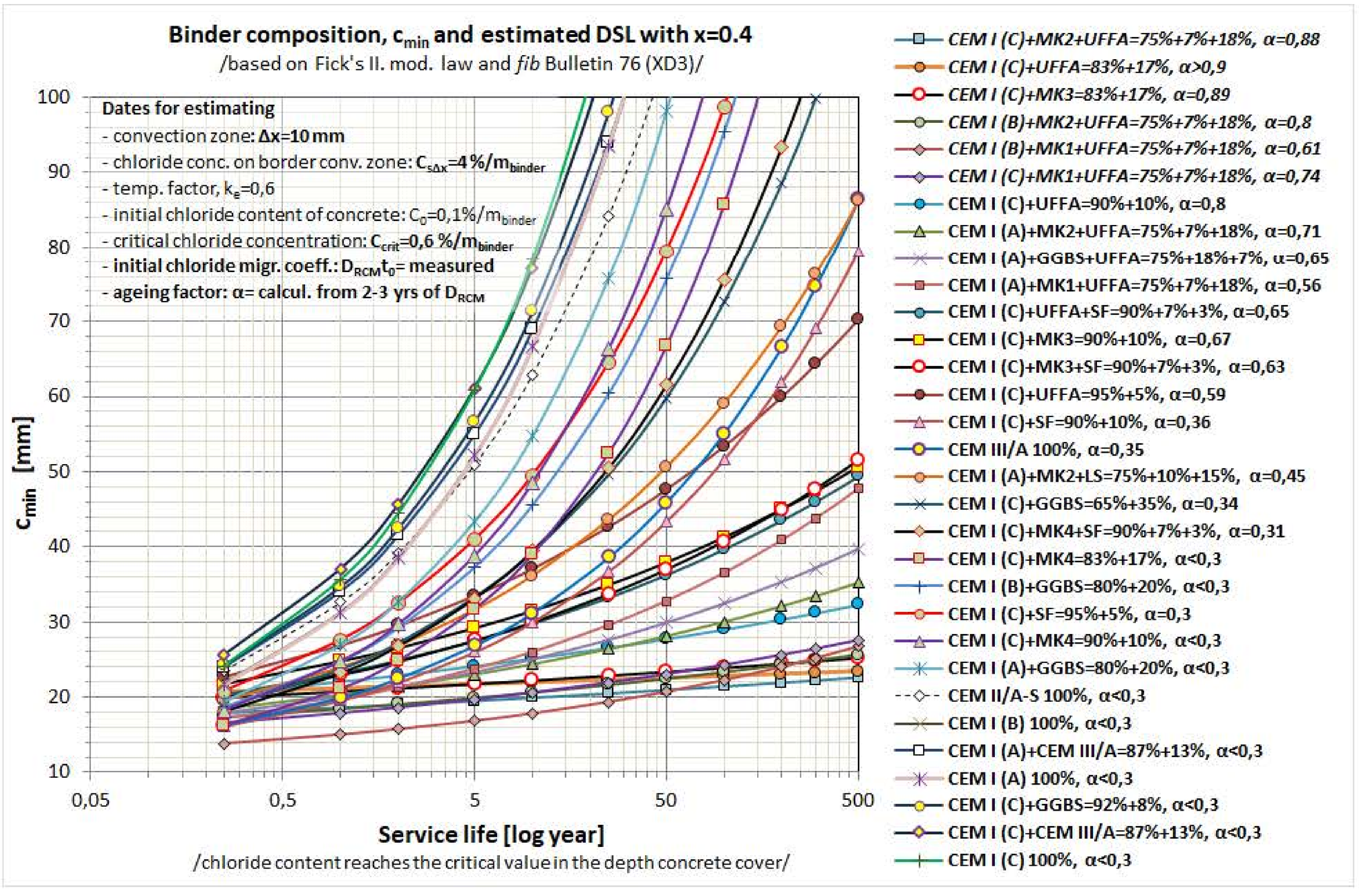
A beton legnagyobb ellenállóképességét jelző XRDS 0,5 osztályba soroláshoz alkalmas összetételeken mért kezdeti kloridmigrációs együttható értéke tág határok, azaz $D_{RCM}t_{(0)} = 1{,}3\times10^{-12}$ m^2/s és $14{,}4\times10^{-12}$ m^2/s között, a kor-tényező pedig szűkebb határok, azaz $\alpha = 0{,}61$-$0{,}95$ között volt.

Bár az egyes számítási módszerek között jelentős különbségek vannak, de ha összehasonlítjuk, hogy 100 év tervezési élettartam és $c_{min} = 40$ mm esetére mely kötőanyagok tűnnek alkalmasnak XD3 környezeti osztályban a szabványtervezet „visszaszámítási" módszerével (tehát az új szabványtervezet szerinti XRDS 0,5 osztályban) és melyek alkalmassága becsülhető *Fick* II. módosított törvénye alapján a *fib* Bulletin 76 módszere szerint (*4. ábra*); akkor azt találjuk, hogy pontosan ugyanaz a 6 kötőanyagtípus (dőlt betűkkel az *1.*, *3.* és *4. ábrán*) tűnik lehetőségként alkalmasnak.

A *Fick*-törvény szerint (*4. ábra*) további 3 típus szintén alkalmasnak tűnik akár 500 év tervezési élettartamra is (repedésmentes betont feltételezve).



3. ábra: Kötőanyag-összetétel, D_{RCM} (t), Összetétel a kor-tényező és az XRDS 0,5-1,5 osztályok (ERC) között, 100 évre

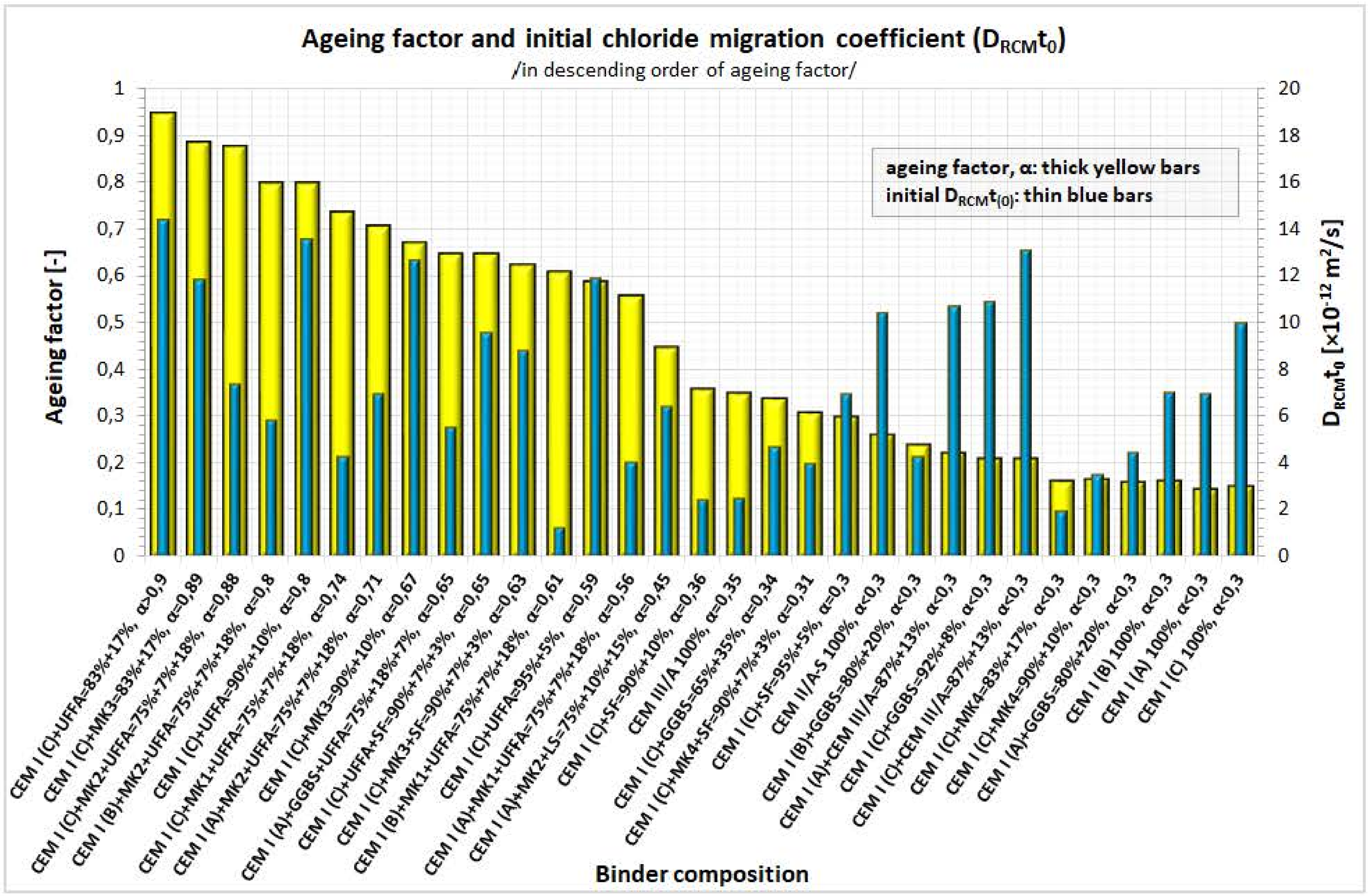


4. ábra: Összefüggés a tervezési élettartam és a betonfedés között a kötőanyag-összetétel függvényében az XD3 környezeti osztály esetére *Fick* II. módosított diffúziós törvénye alapján

Szabványhabarcsokon (x = 0,5) mérve, a DURAFOR-jelentés (*Müller* et al., 2019) összefüggést ír le a kezdeti (28 vagy 90 napos) kloridmigrációs/diffúziós együttható (D_{RCM} $t_{(0)}$) és a Ø20 nm fölötti pórusok aránya és a kötőanyag egyes kémiai összetevői között. A módszer az új cementfajták kezdeti kloridmigrációs/diffúziós együtthatója ($D_{\mathrm{RCM}}t_{(0)}$) gyorsított becslésére nyújt lehetőséget a kötőanyag kémiai és a szabványhabarcs porozimetriai jellemzői alapján. A részletes kutatási jelentés nem terjedt ki sem a későbbi életkorokban becsülhető D_{RCM}, sem a kor-tényező becslésére.

3.2. Kor-tényező („ageing factor”)

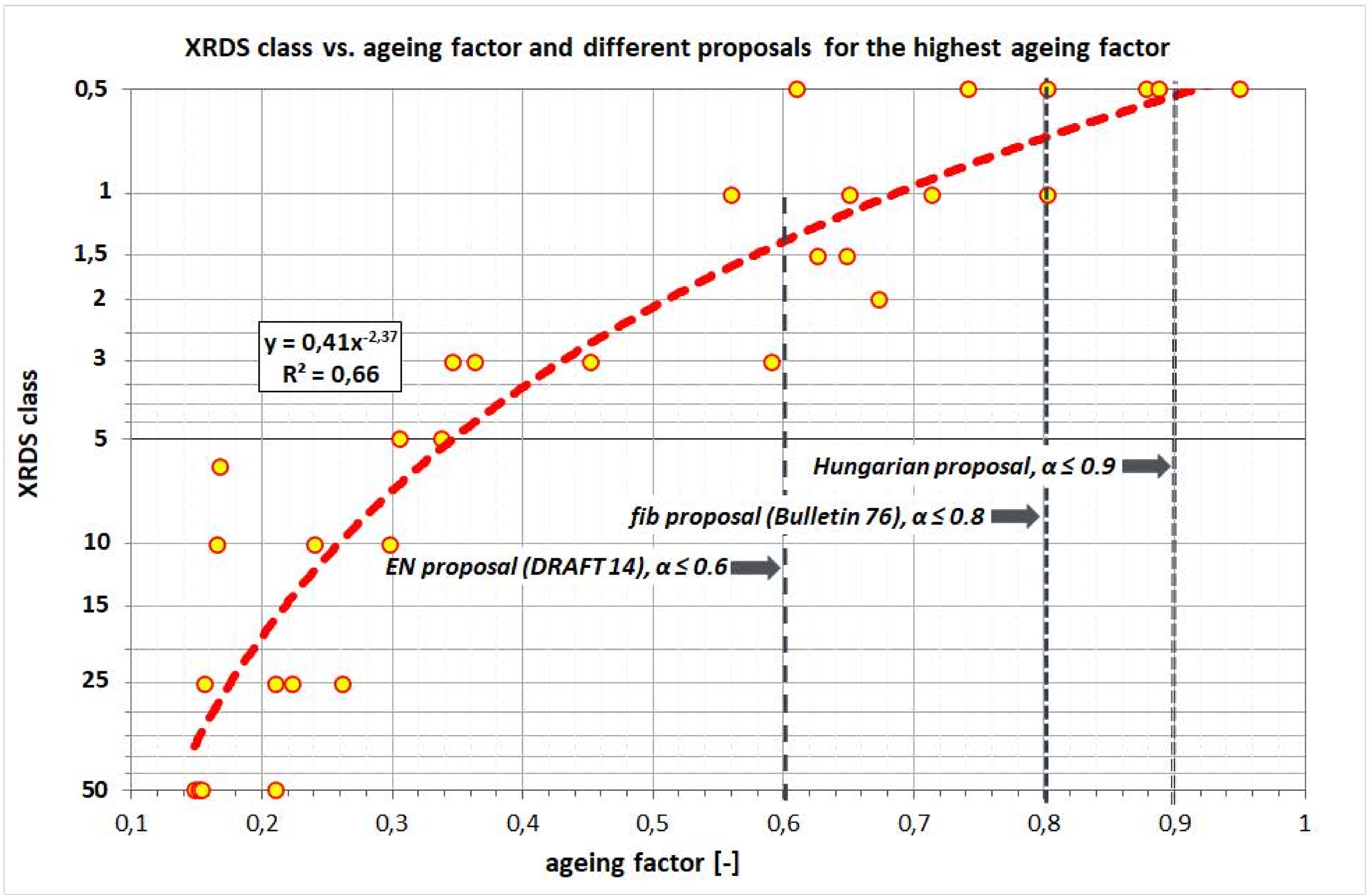
Az *5. ábra* szerint a kor-tényező és a kezdeti (28 napos) kloridmigrációs együttható között nincs összefüggés, illetve a puccolános kiegészítőanyagok esetében gyakori a magasabb (rosszabb) kezdeti kloridmigrációs együttható, amely az idő előrehaladtával erőteljesen javul, és néhány év múlva kiváló kor-tényezőt (jó kloridzárást) eredményez. Ezért önmagában csak a kezdeti kloridmigrációs együttható értéke alapján nem következtethetünk sem a kötőanyag kloridállóságára, sem a vasbetonszerkezet várható használati élettartamára.



5. ábra: Összefüggés a kötőanyag-összetétel és a kor-tényező („ageing factor”), valamint a D_{RCM} $t_{(0)}$ kezdeti kloridmigrációs/diffúziós együttható között

A kor-tényezőre kapott értékek és az EN 206-100 DRAFT 14 szabványtervezet szerinti XRDS-ellenállási osztályok között elfogadható általános összefüggés mutatkozik (R^2 = 0,66 a *6. ábrán*). Minél kisebb (szigorúbb) az XRDS osztály, annál nagyobb (kedvezőbb) kor-tényezőjű kötőanyag szükséges.

A *6. ábrán* megjelölt *fib* javaslat és e cikk szerzői szerinti javaslat (vagyis a kor-tényező legnagyobb figyelembe vehető értéke legyen rendre $\alpha \leq 0{,}8$, illetve $\alpha \leq 0{,}9$) már számos lehetőséget nyújt a kedvezően nagy kloridállósági osztályok (például XRDS 0,5 és 1) elérésére, szemben az EN 206-100 DRAFT 14 javaslatával, ahol a kor-tényező legnagyobb figyelembe vehető értéke α = 0,6.



6. ábra: Összefüggés a kor-tényező („ageing factor") és az XRDS osztály között, valamint javaslatok a kor-tényező legnagyobb, figyelembe vehető értékére

A *7. ábra* szerint az ellenállásoldali XRDS osztályok a *6. ábrán* közölthöz képest nagyobb pontossággal becsülhetők, ha figyelembe vesszük a kor-tényezőn kívül a kezdeti kloridmigrációs együttható értékét is.

7. ábra: Összefüggés az XRDS osztály (D_{RCM} $t_{(0)}$) és a kor-tényező („ageing factor") között

A vizsgált összetételeket a kor-tényező és a kezdeti kloridmigrációs együttható értéke alapján csoportosítva, és az egyes kloridállósági (XRDS) osztályok várható elérésére összpontosítva, a kapott eredmények a *7. ábra* szerinti összefüggéseket mutatják, melyekből az alábbi következtetések vonhatók le:

- minden egyes kloridállósági (XRDS) osztályon belül érvényesnek mutatkozik, hogy a nagyobb (kedvezőtlenebb) kezdeti kloridmigrációs együtthatóhoz (D_{RCM} $t_{(0)}$) kedvezőbb kor-tényező („ageing factor") társul (megjegyzés: a későbbi vizsgálatok szerint ez a következtetés nem érvényes a 10%-nál nagyobb mészkőliszt-tartalmú kétösszetevős kötőanyagra, és a kiegészítőanyagként csak mészkőlisztet tartalmazó cementekre)
- az XRDS osztály csökkenésével (szigorodásával) egyre szorosabbá válik a korreláció a növekvő (kedvezőbb) kor-tényező és a kezdeti kloridmigrációs együttható szintén növekvő (kedvezőtlen) értéke között (R^2 = 0,97-ig)
- a hosszabb tervezési élettartam és/vagy kisebb betonfedés céljából kedvezőbb kloridállósági osztály (XRDS 0,5 és XRDS 1) eléréséhez különösen fontos az olyan fizikai és kémiai tulajdonságú kötőanyag-összetétel megválasztása, amelynek kor-tényezője meghaladja az α = 0,6 értéket.

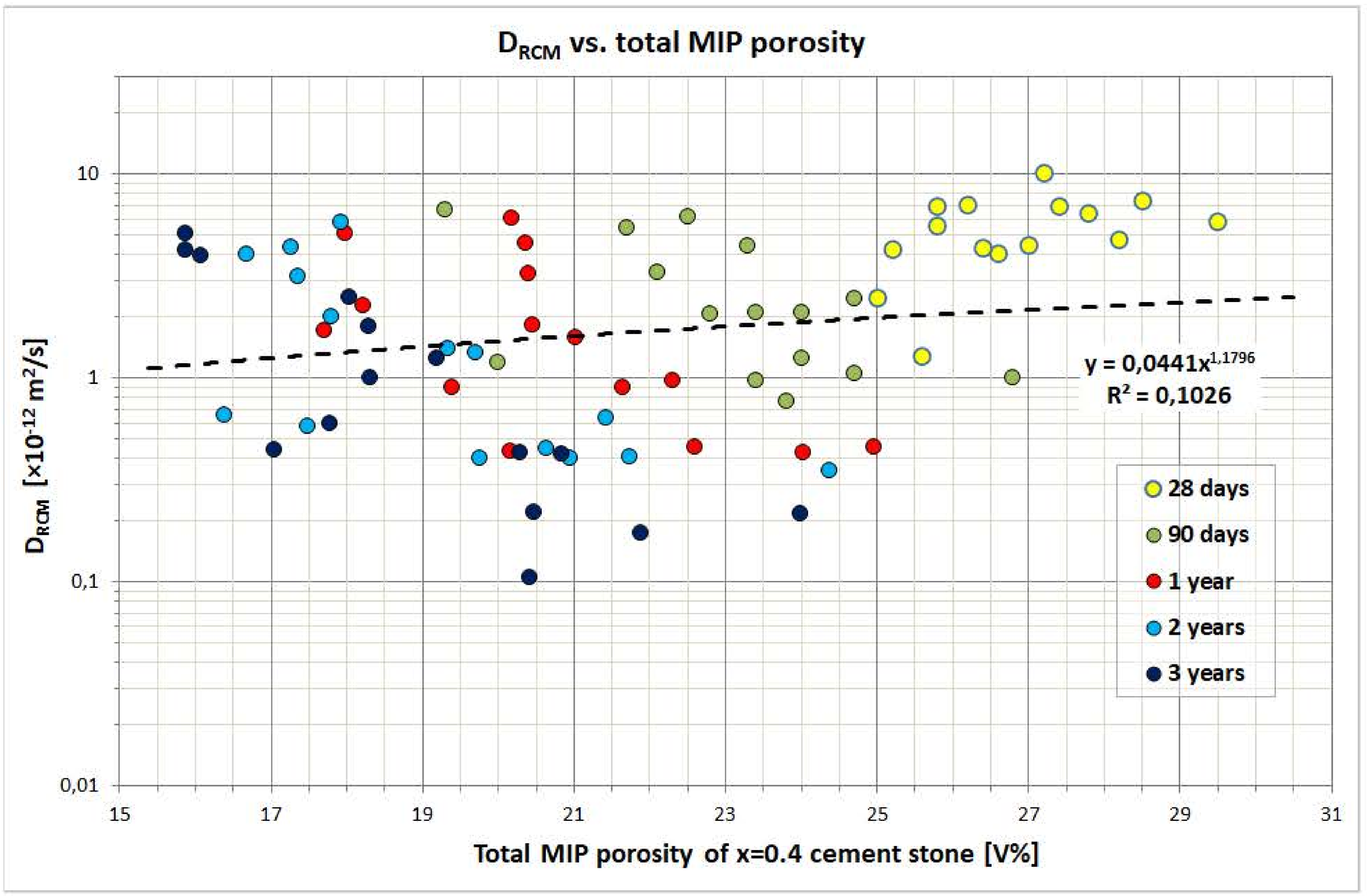
Meg kell említeni, hogy az EN 206-100 DRAFT 14 tervezetben a kor-tényező legkisebb/legnagyobb értéke rendre α = 0,3/0,6; vagyis a szabványtervezet leginkább a *7. ábra* szerinti XRDS 1,5-5 ellenállási osztályokra összpontosít.

Mivel e szabványtervezet nem tárgyal α = 0,6-nál nagyobb kor-tényezőt, és e kor-tényező a szabványtervezet szerint csak igen alacsony kezdeti kloridmigrációs együtthatóval társulva ($D_{RCM}t_0 \leq 4\times10^{-12}$ m^2/s) teszi lehetővé XD3 környezeti osztály és 100 év tervezési élettartam esetére a kis (például c_{min} = 40 mm) betonfedést; ezért a szabványtervezet e része túl szigorúnak tekinthető. A *fib* Bulletin 76 szerint a kor-tényező legnagyobb figyelembe vehető értéke α = 0,8, illetve – némely, különlegesnek tekinthető kötőanyag-társítás esetén – hazai mérési eredményeink alapján akár α = 0,9 is lehet. Az $\alpha \geq$ 0,8 kor-tényező alkalmazhatósága tenné lehetővé a sikeres kötőanyag-összetételekben rejlő lehetőségek kihasználását, az ilyen esetekben megvalósítható kisebb betonfedés alkalmazását.

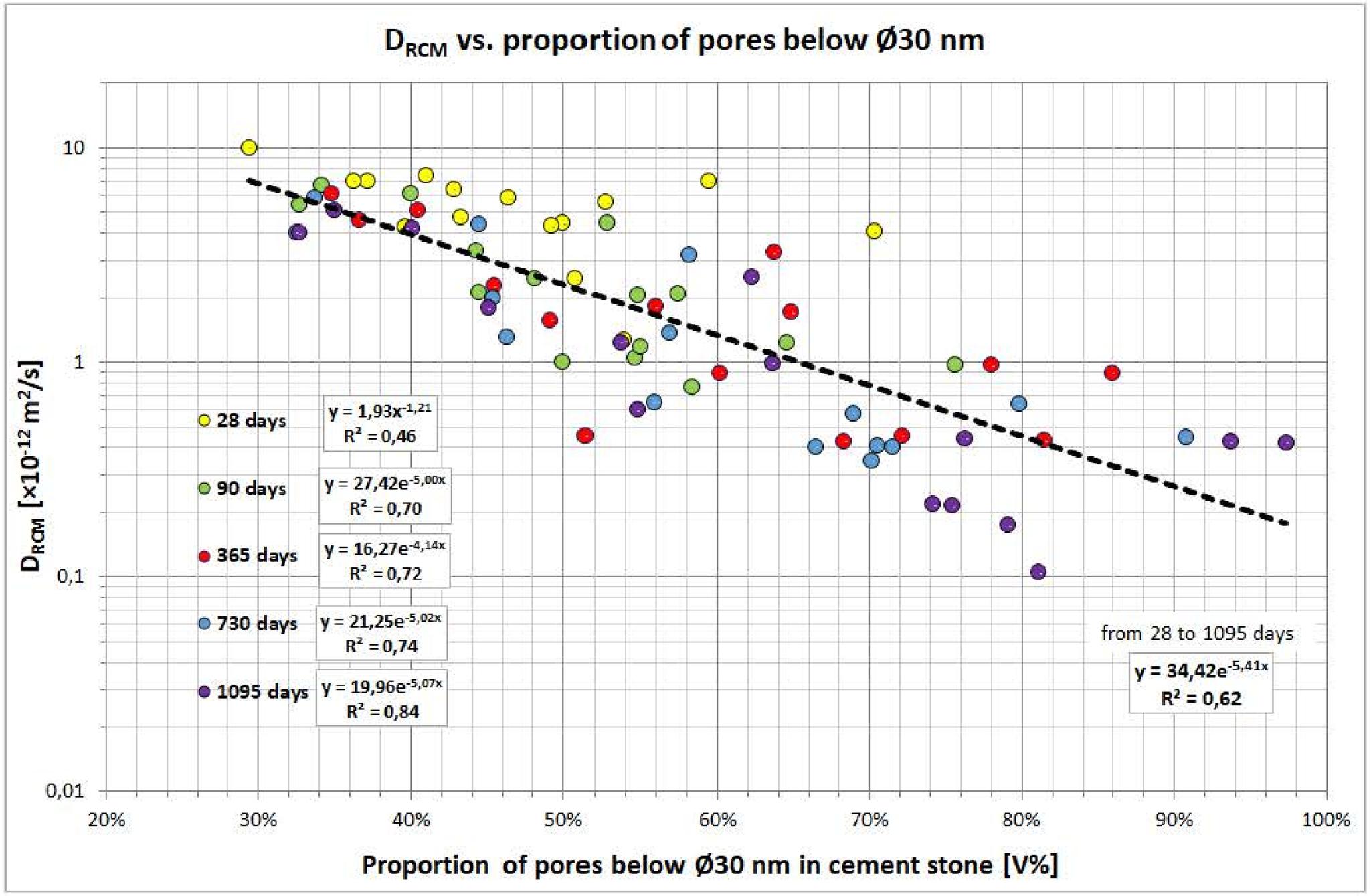
3.3. Porozitás, pórusméret-eloszlás, egyenértékű pórusméretek

A *8. ábra* szerint a teljes MIP porozitás (higanybesajtolással mért porozitás) nincs összefüggésben a kloridmigrációs együttható értékével (R^2 = 0,1), így a teljes porozitás ismerete általában nem segít sem a tervezési, sem pedig a tényleges használati élettartam becslésében.

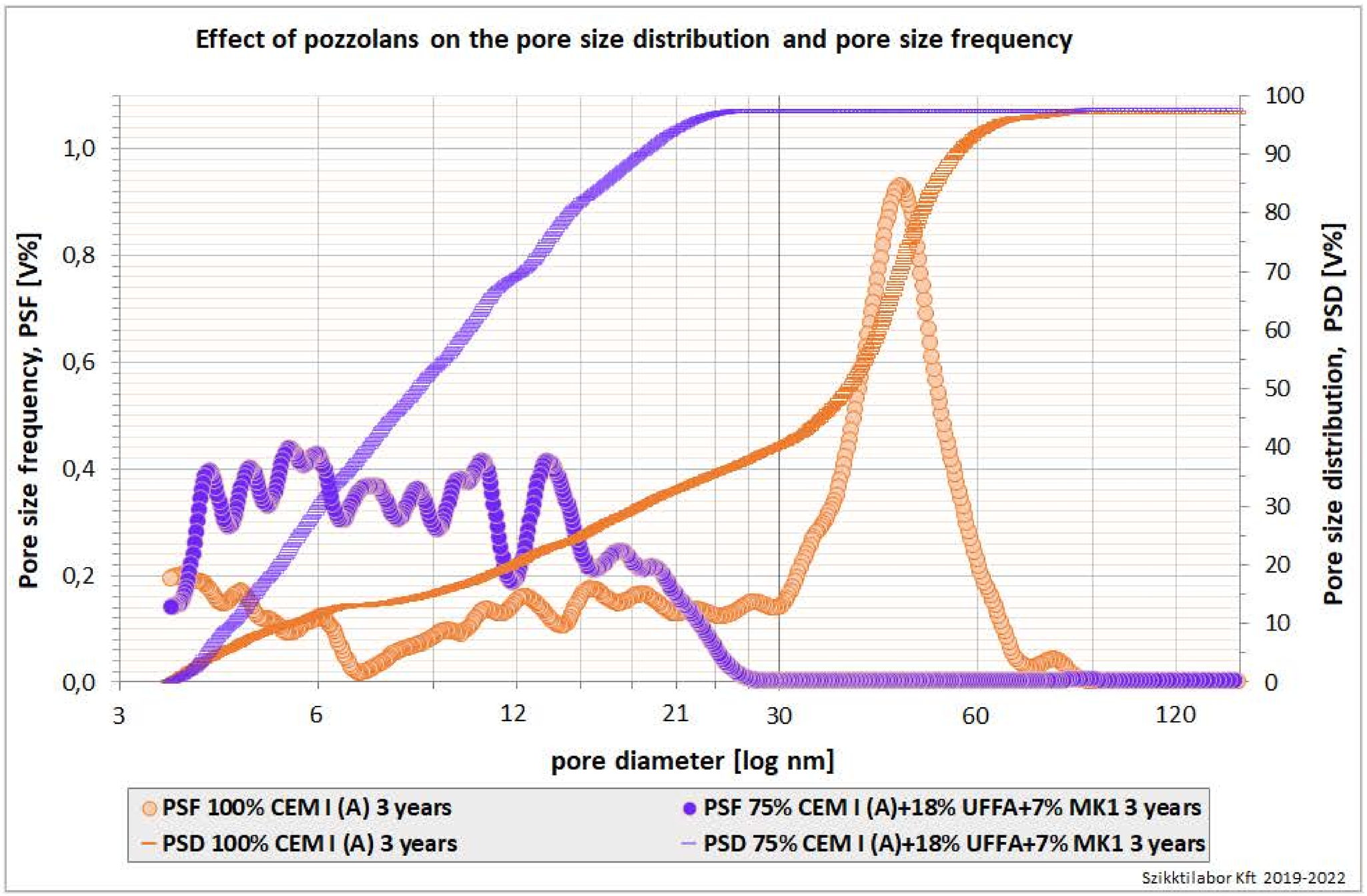
A finom pórusok részaránya a cementkövekben (például Ø 30 nm alatt) 28 naptól, de különösen 90 naptól jó magyarázatot ad az egyes kötőanyagok kloridállósági viselkedésére, amint azt a *9. ábra* mutatja. A kötőanyagok nagyon eltérő kloridmigrációs viselkedésének anyagtani magyarázataként a pórusméret-eloszlási és gyakorisági diagramok szemléletesnek mutatkoznak (*10, ábra*).



8. ábra: Összefüggés a D_{RCM} és a MIP porozitás között



9. ábra: Összefüggés a D_{RCM} és a Ø30 nm alatti pórusok között

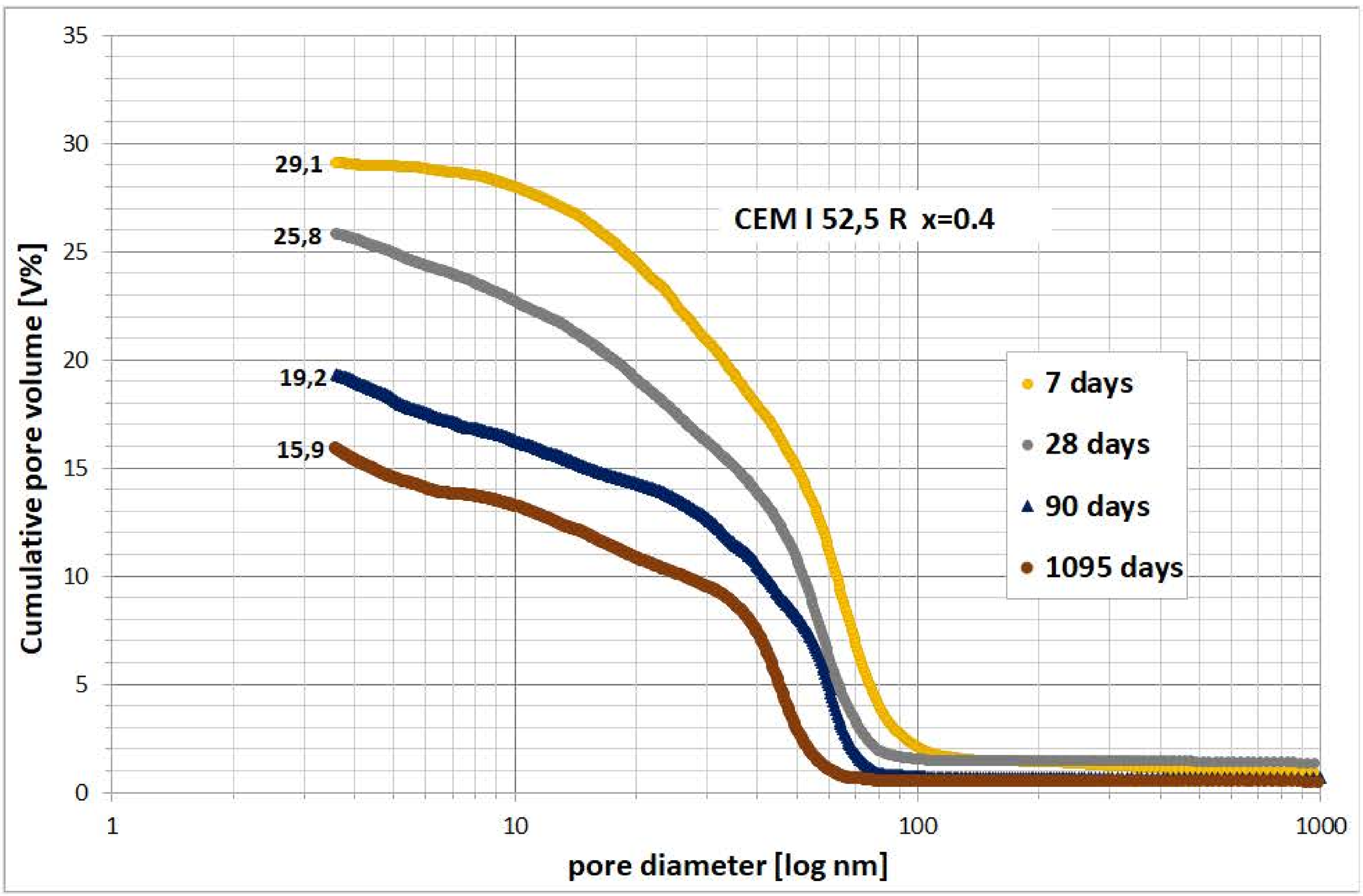


10. ábra: „Jó és rossz” pórusméret-eloszlás és gyakorisági görbék („jó”: kék vonal, „rossz”: narancs vonal)

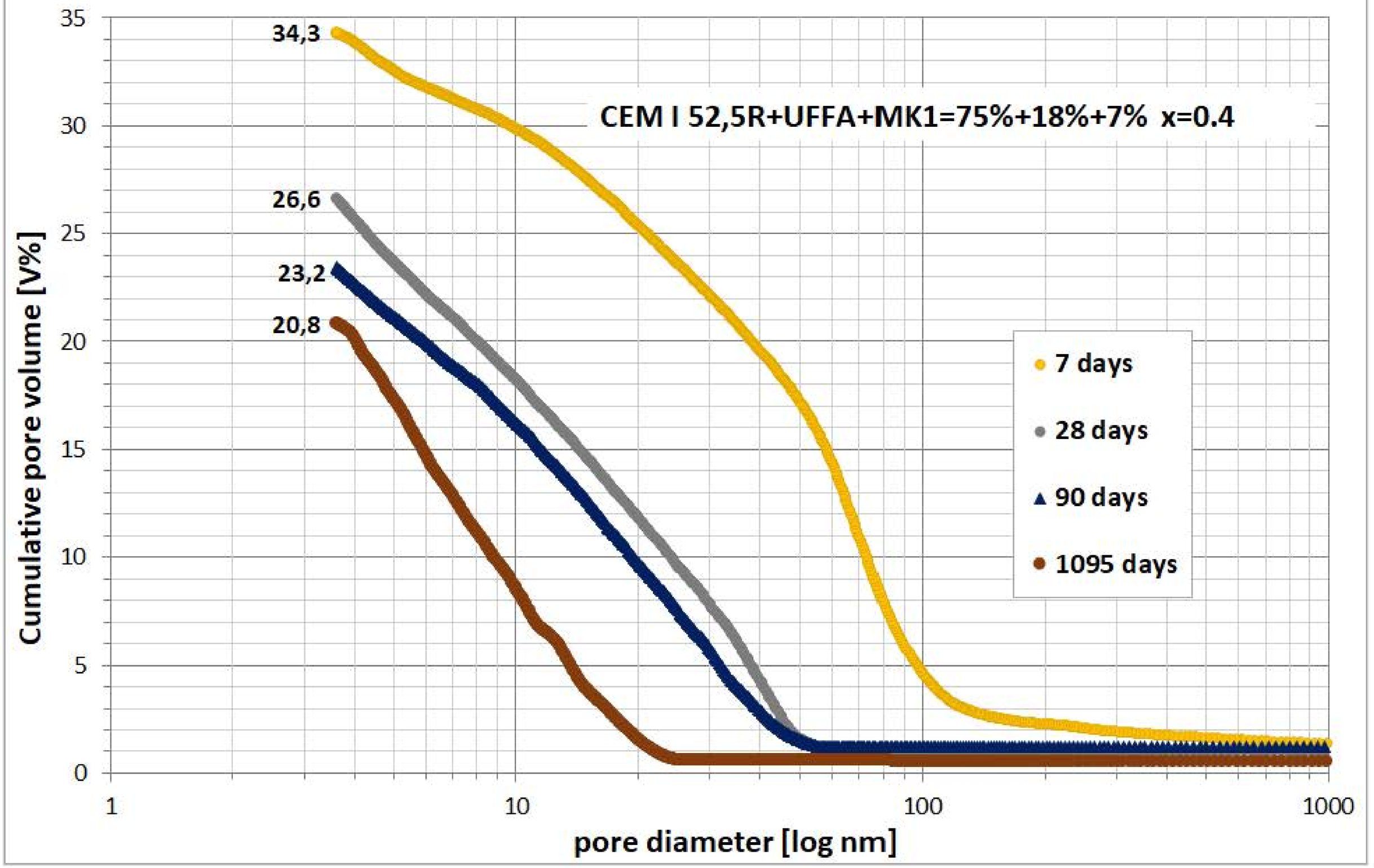
Ha „csak” karbonátosodás okozta korrózióval kell számolni, akkor a kisebb porozitásra lehetőséget nyújtó kötőanyag és a kisebb w/$CaO_{reactive}$ arányú pépfázis ajánlott (*Leemann*, 2017; *Greve-Dierfeld* et al., 2020); még abban az esetben is, ha a pórusméret-eloszlás esetleg „rossz”. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy leginkább a CEM I cementek és kis víz-cement tényező használatával kaphatjuk a legkedvezőbb eredményt a karbonátosodás okozta korrózióval szemben.

Amennyiben viszont kloridtámadás is várható, akkor kedvezőbb pórusméret-eloszlású cementkő szükséges, még ha a teljes porozitás valamivel nagyobb is (*11-12. ábra*). A CEM I cementfajtákhoz képest minden vizsgált korban valamelyest nagyobb volt a kiegészítőanyagos cementkövek teljes porozitása, kivéve, amikor a kiegészítőanyag szilikapor volt.

A kis áteresztőképességű, többösszetevős cementkövekben a hidratáció során a Ø20-50 nm alatti pórusok térfogata folyamatosan növekedést mutat a kisebb pórusméretek irányába. A pórustérfogat Ø20 nm nagyság alatti növekedése egyes kiegészítőanyag társítások esetében különösen jelentős (*12. ábra*), míg ez a fajta pórusméret-finomodás a CEM I cementkövek esetében nem mutatkozott. A „tiszta” cementkövek esetében a porozitás időbeni csökkenése a Ø50 nm feletti mikrokapillárisok "fogyásának" eredménye (*11. ábra*).



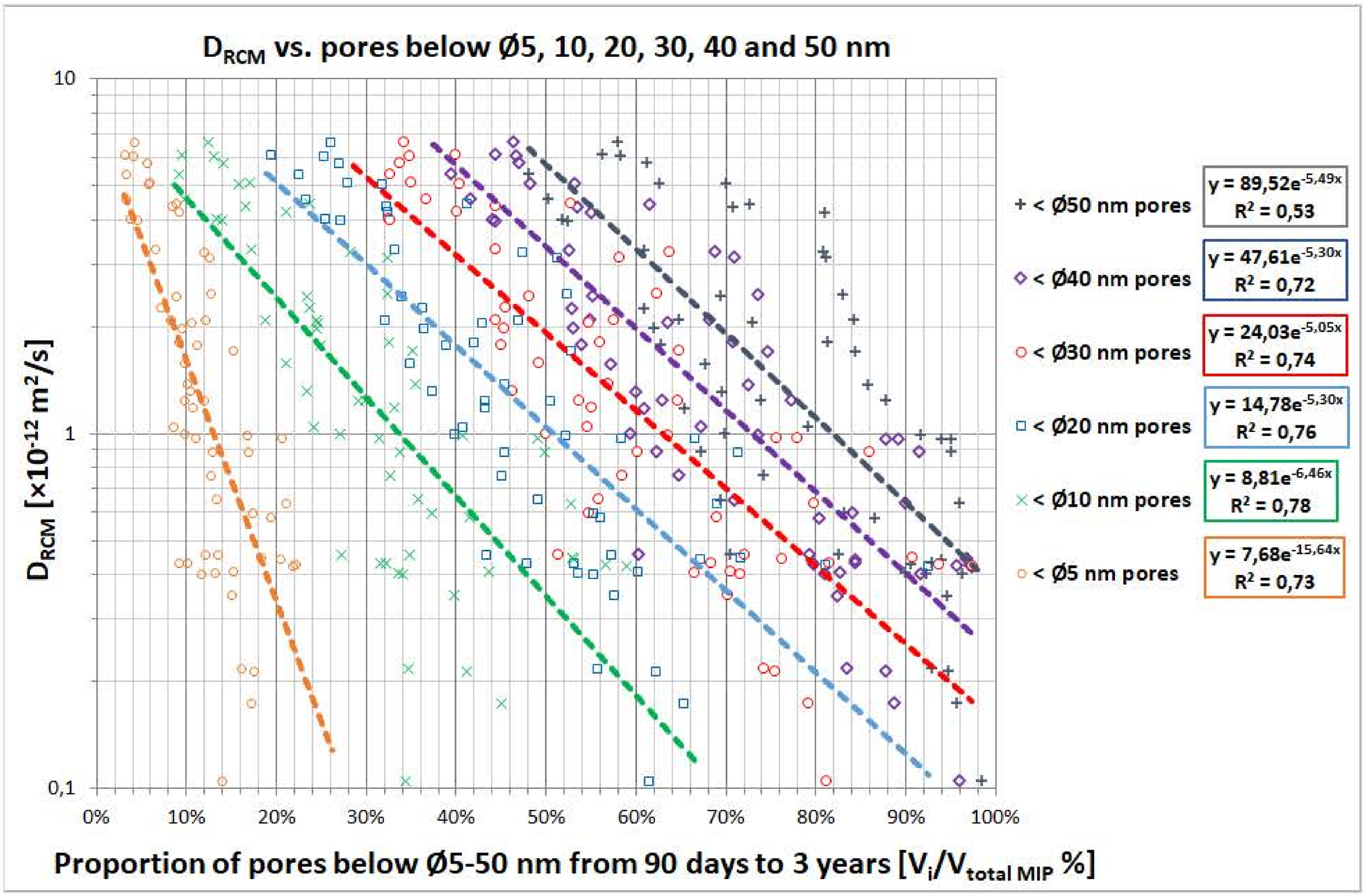
11. ábra: Jó porozitás, de rossz pórusméret-eloszlás



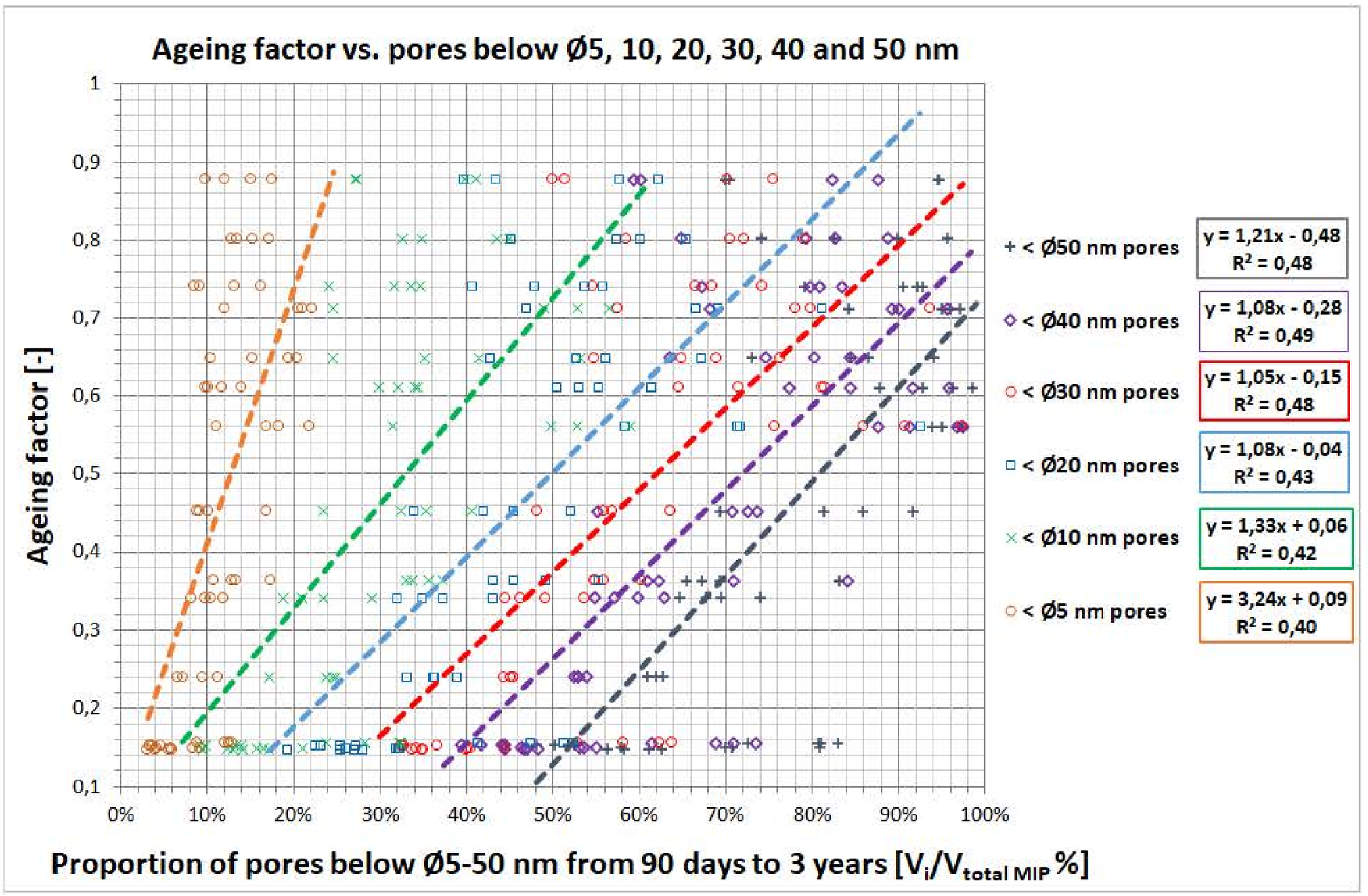
12. ábra: Rosszabb porozitás, de kiváló pórusméret-eloszlás

A kis/mérsékelt teljes porozitás érdekében *a karbonátosodásnak és kloridtámadásnak egyaránt kitett vasbetonszerkezetek betonjához a kötőanyag-társítást ezért gondosan kell megválasztani*. Célszerű olyan kiegészítőanyag, esetleg azok társításai használata, amely erős javító hatással van a kor-tényezőre, így az kisebb adagolásban, tehát a karbonátosodást kevésbé gyengítő módon is hatásos a kloridtámadás ellen (lásd például a *2. ábrán* az UFFA és az MK1-3 kiegészítőanyagok hatását).

A pórusméret-eloszlás vizsgálata jó lehetőséget nyújt arra, hogy minél korábban (már 90 napos kortól) becsülhető legyen a 2 vagy 3 éves kloridmigrációs együttható. Ez a lehetőség a D_{RCM} és a Ø5, 10, …, 40 nm alatti pórusok részaránya közötti jó összefüggésnek ($R^2 = 0,72$-$0,78$) köszönhető (*13. ábra*). Sajnos meg kell azonban állapítani, hogy a pórusméret-eloszlásnak a kor-tényezővel való összefüggése nem túl szoros (Ø5, 10, …, 40 nm-es pórusméretek esetén $R^2 \approx 0,5$, lásd *14. ábra*).



13. ábra: Összefüggés a D_{RCM} és az Ø5, 10, 20, 30, 40 és 50 nm pórusok részaránya között, 90 napos és 3 éves kor között

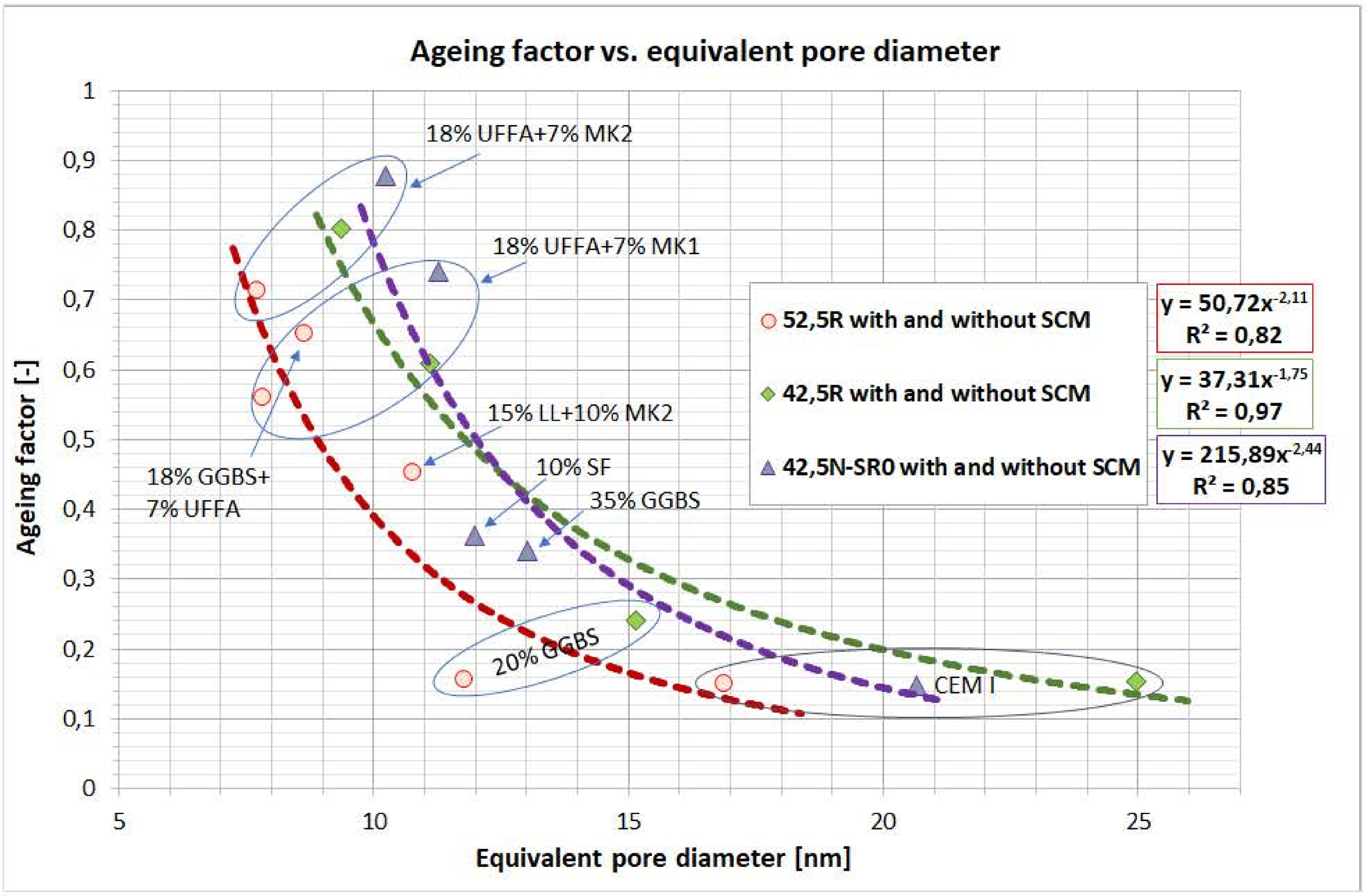


14. ábra: Összefüggés a kor-tényező és az Ø5, 10, 20, 30, 40 és 50 nm pórusok részaránya között, 90 napos és 3 éves kor között

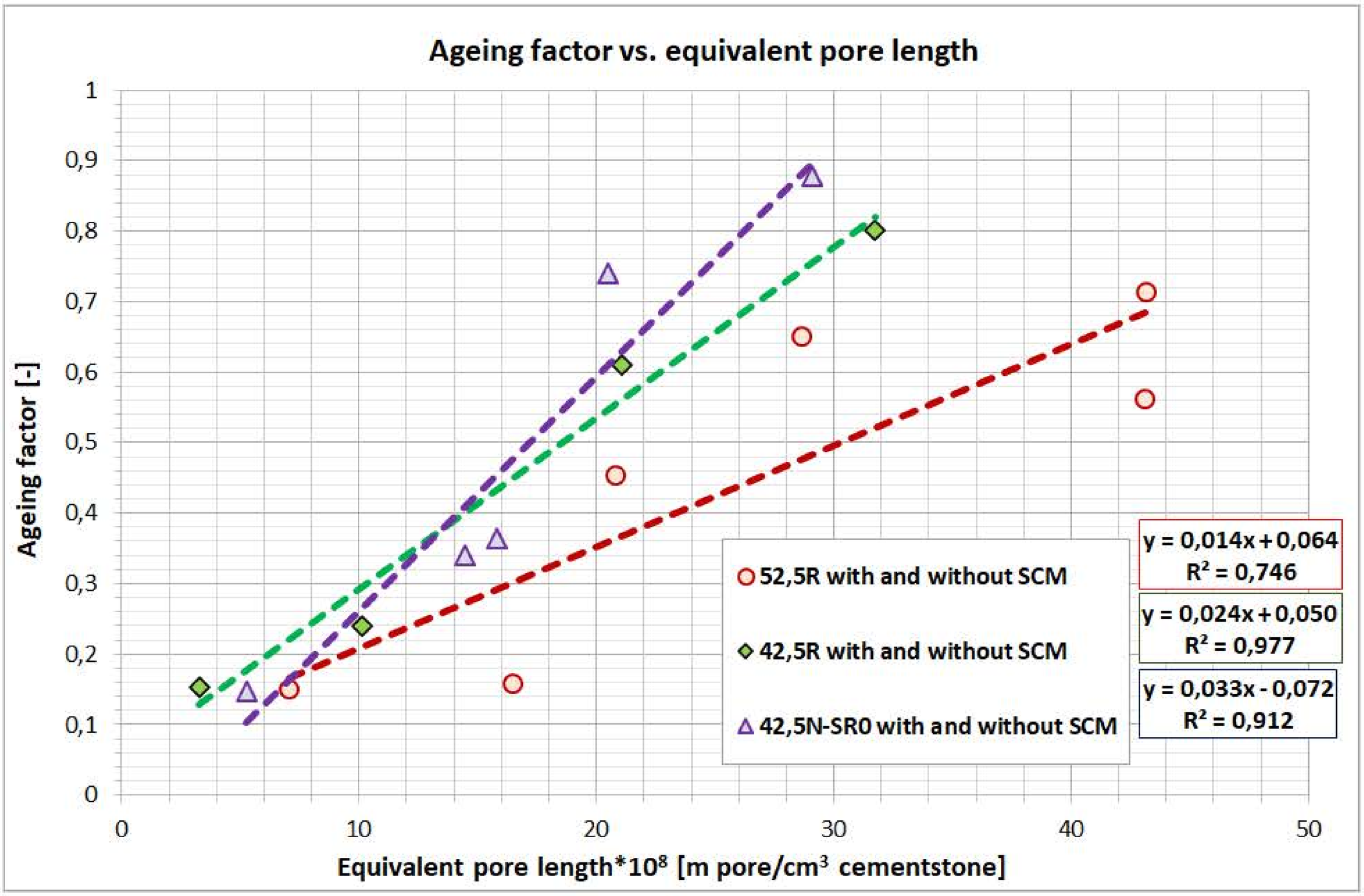
Ugyanakkor igen jó az összefüggés – mind kiegészítőanyaggal, mind pedig anélkül – a kor-tényező és az ún. egyenértékű pórusméretek között (R^2 = 0,75-0,97), amennyiben az összefüggést cementfajtánként külön-külön vizsgáljuk meg, (*15.* és *16. ábra*).

Az egyenértékű pórusátmérő (nm) és -hossz (m) geometriai alapon számolható azzal a leegyszerűsítéssel, hogy a pórusok alakját körhengerként vesszük figyelembe. A mért teljes porozitás (V%), a pórusok teljes (hengerpalást) felülete (m^2/g) és a cementkősűrűség (g/cm^3) adataiból számolhatók az ún. egyenértékű pórusméretek.

Mivel a különböző iparágakban és kutatási területeken használt higanyporoziméterek szoftvere – a piaci igények miatt – tömegre vetített fajlagos porozitásos adatokat (például mm^3/g, mm^2/g stb.) közöl, ezért a cementkövek eltérő sűrűsége miatt a „betonos szakterületen" szükséges térfogati porozitásos adatokra kell átszámolni a tömegi adatokat. A cementkő sűrűségi adatával kiszámolt fajlagos térfogati porozitás és fajlagos térfogati pórusfelület meghatározását követően geometriai alapon számolható a cementkő egyenértékű pórusátmérője és hossza: $\varnothing_{equivalent} = 4V/A$ és $\ell_{equivalent} = A/\varnothing/\pi$ (lásd egyenértékű pórusméreteket az *1. táblázatban*)



15. ábra: Összefüggés a kor-tényező és az egyenértékű pórusátmérő között 3 éves korban

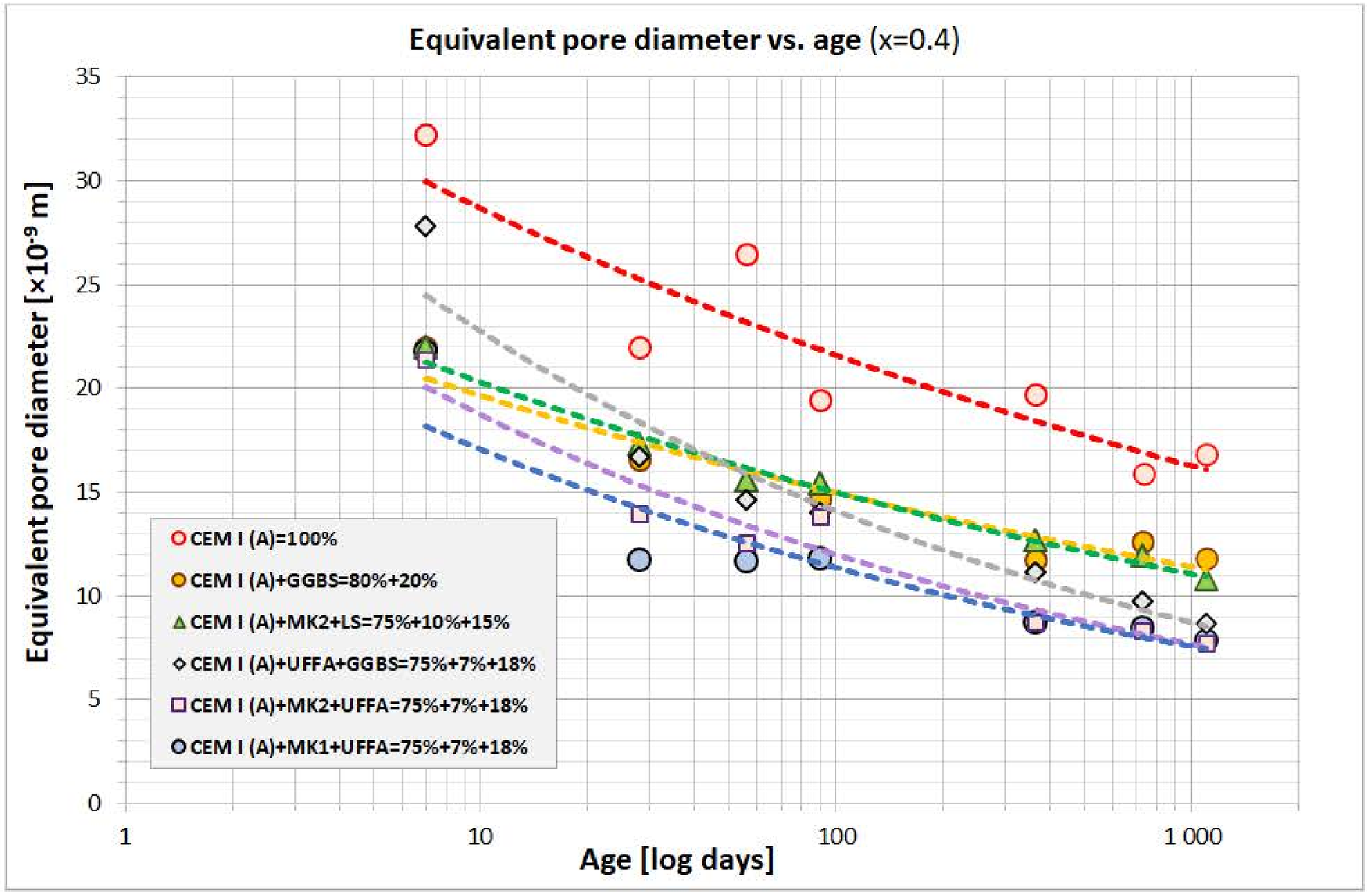


16. ábra: Összefüggés a kor-tényező és az egyenértékű egyenértékű pórushossz között 3 éves korban

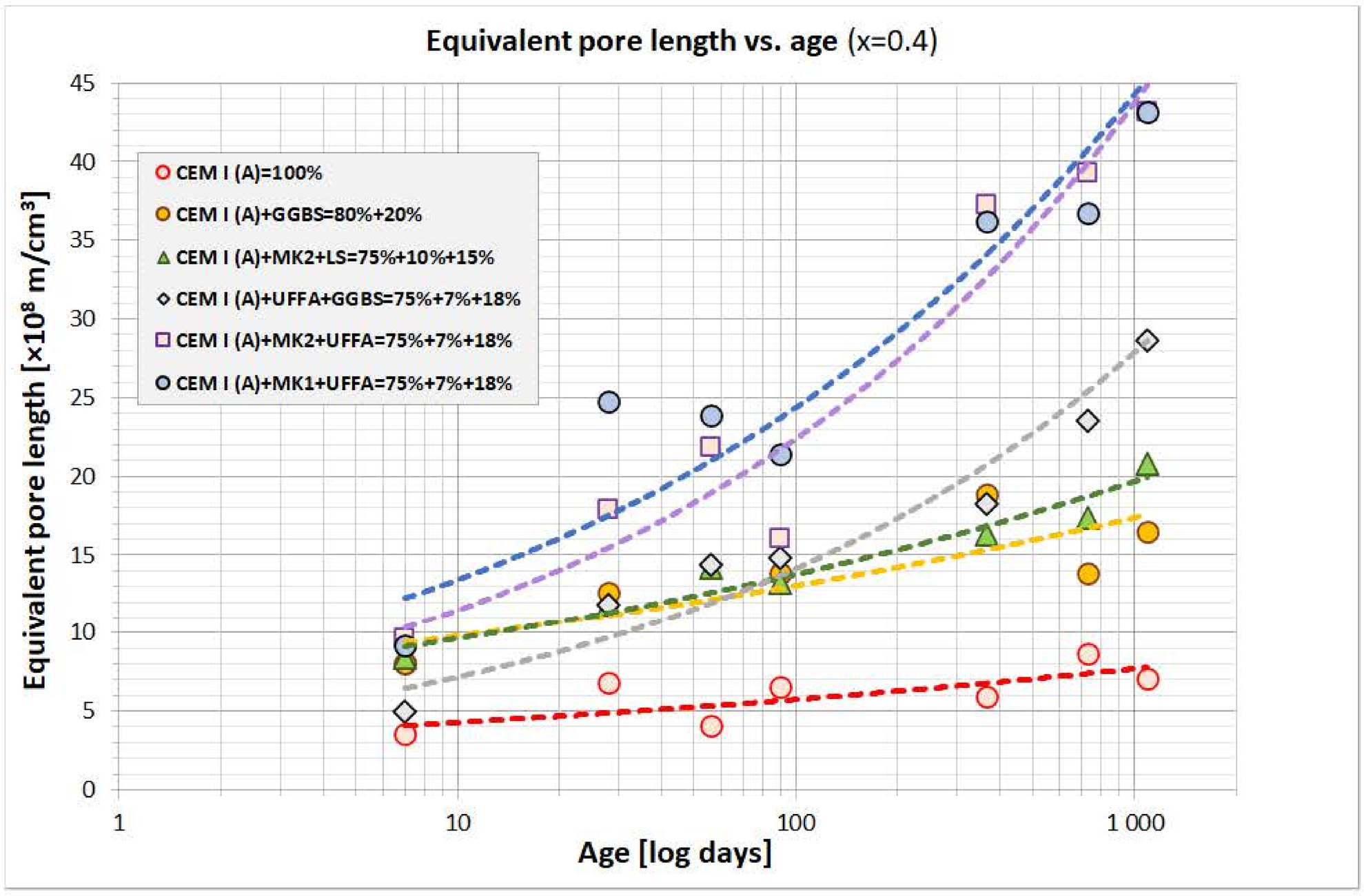
A *17-18. ábrák* a CEM I (A) típusú cementtel készült cementkövek egyenértékű pórusmérete és kora közötti összefüggést mutatják be kiegészítőanyagokkal és azok anélkül.

A *17. ábra* szerint a CEM I (A) cementkövek egyenértékű pórusátmérőjének időbeni csökkenése mind kiegészítőanyagokkal, mind pedig anélkül tendenciájában hasonló. Megfigyelhető, hogy a pórusátmérő mind a korai, mind pedig a későbbi korban számszerűen kisebb, ha a cementkő kiegészítőanyagot is tartalmaz. Például míg a CEM I (A) cementkő egyenértékű pórusátmérője kiegészítőanyag nélkül 7 napos és 3 éves korban rendre kb. 30 nm és 16 nm; addig a 3-összetevős kötőanyagok (például a metakaolinokat + kőszénpernyét tartalmazók) pórusátmérője 7 napos, illetve 3 éves korban kb. 19 nm és 8 nm.

A *18. ábra* szerint az egyenértékű pórushossz a kiegészítőanyag nélküli CEM I (A) cementkőben a kor előrehaladtával csak kissé, míg a kiegészítőanyagos cementkövekben jelentős mértékben növekszik. Például míg a kiegészítőanyagmentes CEM I (A) cementkő egyenértékű pórushossza 7 napos kortól 3 éves korig $3,5\times10^8$ m/cm^3-ről 7×10^8 m/cm^3-re nőtt, addig a 2- és 3-összetevős kötőanyagrendszerekben a növekedési tendencia jóval erősebb (5-10×10^8 m/cm^3-ről 16-43×10^8 m/cm^3-re).



17. ábra: Összefüggés az egyenértékű pórusátmérő és a kor között



18. ábra: Összefüggés az egyenértékű pórushossz és a kor között

A 2- és 3-összetevős kötőanyagok egyenértékű pórusátmérője tehát a kor előrehaladtával (esetünkben 3 éves korig) durva közelítésben körülbelül felére

csökken a tiszta cementkőhöz képest, a pórushosszuk viszont többszörösére nő (2-6-szoros értékre).

Az egyenértékű pórusméretek geometriai modellje segít magyarázatot adni a kloridionok kötőanyagfüggő migrációs sebességének eltéréseire.

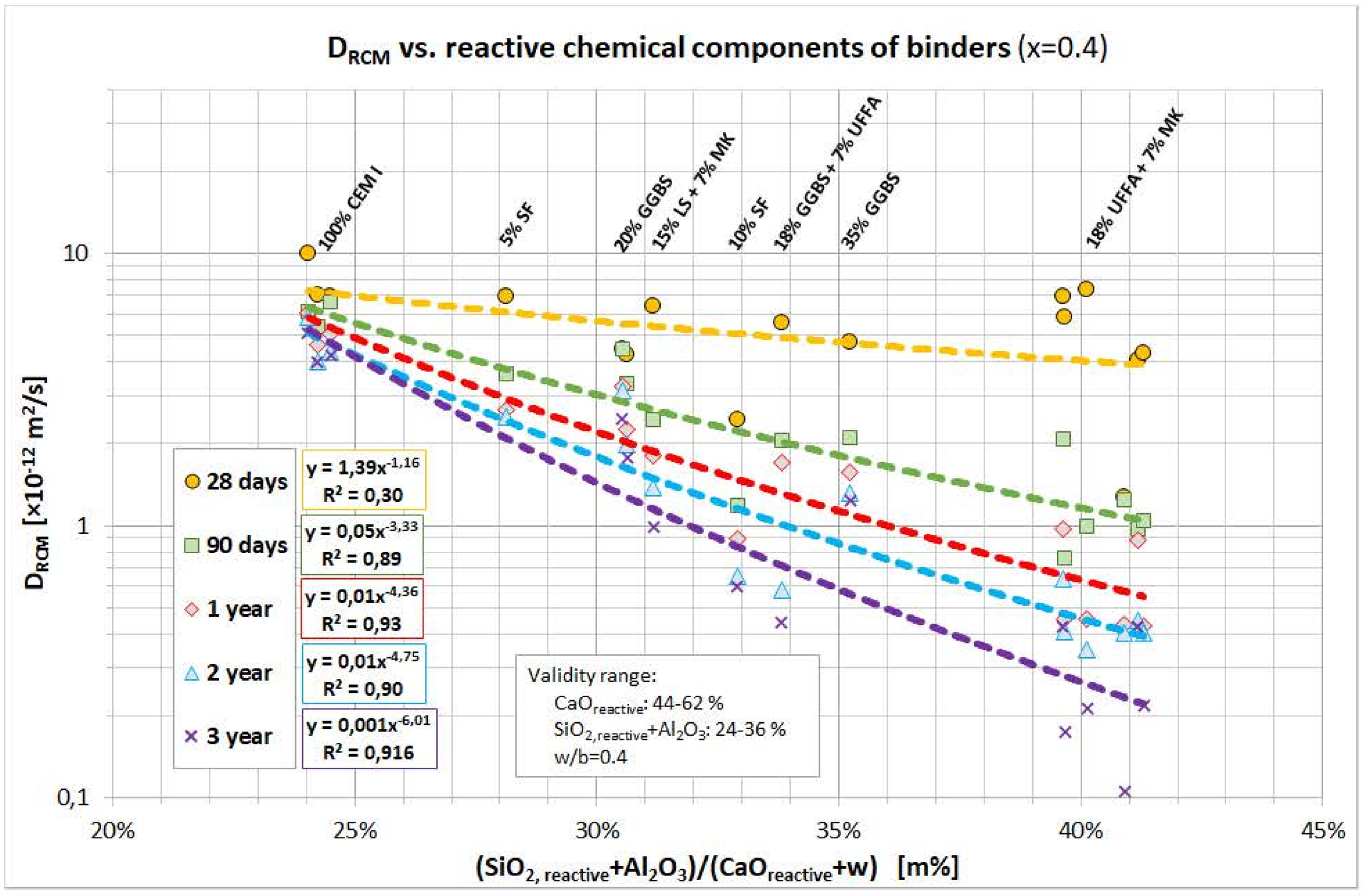
Kijelenthető tehát, hogy a pórusméret-eloszlás, gyakoriság vagy egyéb pórusméret-jellemzők önmagukban is meghatározóak a kloridmigrációs együttható értékére, de a *14-16. ábrák* szerint a kor-tényező becslésére csak azonos típusú cement esetében javasolhatók.

A mindössze 90 napos egyenértékű pórusméretek ismerete is már nagy segítséget nyújt a kor-tényező becsléséhez, ha a különböző kiegészítőanyagok kor-tényezőre gyakorolt hatását kell számszerűsíteni adott cementtípusra (lásd *15-18. ábra*).

3.4. A kötőanyagok reakcióképes kémiai összetevői

A *19-20, ábrán* látható eredményeket tekintve egyértelmű, hogy a kloridállóság tekintetében legegyszerűbb a kémiai jellemzőket meghatározó paraméterként figyelembe venni. A kötőanyag nagyobb reakcióképes $SiO_2+Al_2O_3$ tartalma és kisebb reakcióképes CaO tartalma eredményez kloridállóbb cementkövet.

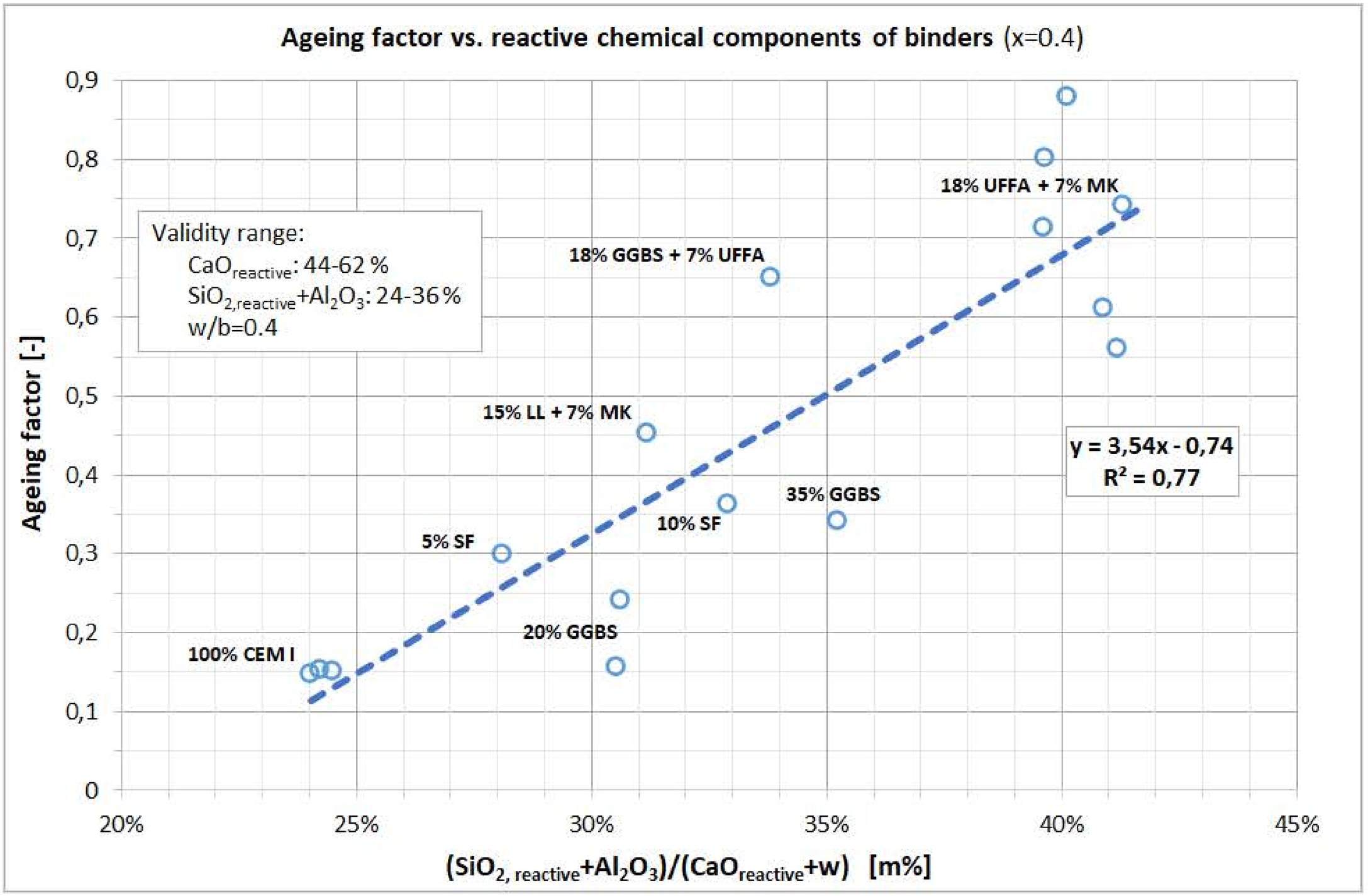
A cementkő kloridmigrációs együtthatója (D_{RCM}) és a kötőanyag kémiai jellemzői közötti összefüggés 90/365/730/1095 napos korban rendre $R^2 = 0,89/0,93/0,9/0,92$ (lásd a *19. ábrát*).



19. ábra: összefüggés a kémiai összetétel, mint a kötőanyag „genetikai adottsága" és a D_{RCM} között

A kor-tényező szintén jó összefüggést mutat (R^2 = 0,77) a kémiai összetétel jellemzőivel (lásd a *20, ábrát*).

A kötőanyag reakcióképes kémiai összetevői ismeretének óriási előnye, hogy gyakorlatilag mindenfajta porozimetriai vagy kloridmigrációs mérés nélkül is jól becsülhetővé válik mind a kloridmigrációs együttható különböző korokban várható értéke (90 naptól 3 évig), mind pedig a kor-tényező (például célszerűen már a cementgyártás során).



20. ábra: Összefüggés a kötőanyag kémiai jellemzői és a kor-tényező között

4. Következtetések

A jelen cikkben említett észrevételeinkkel támogatni kívánjuk az EN 206 betonszabvány megújítását a vasbetonszerkezetek hosszútávú tartóssági feltételeinek meghatározásához.

Napjainkban számos új cementfajta és kiegészítőanyag jelenik meg, amelyek hosszú távú ellenállóképességére megfelelő mérnöki becslést kell adnunk.

Jelen cikk a porozimetriai mérések és a kémiai összetételi adatok alapján a különböző cementfajták, illetve cementkötésű kötőanyagok kloridmigrációs együtthatói és kor-tényezői közötti nagy eltérések magyarázatát tűzte ki célul. Az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

1. *Kloridmigrációs együttható és pórusméret-eloszlás.* 90-1100 napos (1100 napos ~ 3 éves) korú cementkövek teljes (MIP) porozitásának 15-25 V%-os tartományán belül megfelelő összefüggés ($R^2 \geq 0{,}72$) mutatkozik a kloridmigrációs együttható értéke és a cementkő Ø5, 10, 20, 30 és 40 nm alatti pórusainak részaránya között. Minél nagyobb a Ø5, 10, 20, 30 és 40 nm alatti pórusok teljes porozitáson belüli részaránya, annál kisebb a kloridmigrációs együttható értéke. Például, ha 90 napos és 3 éves kor között a Ø5, 10, 20, 30 és 40 nm alatti pórusok részarányára a teljes pórustérfogat rendre 20±2%, 52±4%, 73±5%, 86±5 és 95±5% V%-át kapjuk, akkor a 3 éves korban becsülhető kloridmigrációs együttható $D_{RCM,3év} \sim 0{,}2\times10^{-12}$ m^2/s és $0{,}4\times10^{-12}$ m^2/s közötti, és a várható kor-tényező pedig α ~0,7-0,8 közötti érték (lásd *13-14. ábra*). Ezek a jellemzők megfelelnek az EN 206-100 DRAFT 14 szabványtervezet szerinti XRDS 0,5-1,5 kloridállósági osztály követelményeinek (lásd *6. ábra*). A kezdeti kloridmigrációs együttható értékének ismeretében tovább pontosítható az anyagoldali ellenállás osztálya. Például, ha a $D_{RCM}t_{(0)} = 3\times10^{-12}$ m^2/s és 6×10^{-12} m^2/s közötti, illetve 7×10^{-12} m^2/s és 12×10^{-12} m^2/s közötti, akkor a becsülhető kloridállósági osztály rendre XRDS 0,5, illetve XRDS 1 (lásd *7. ábra*).

2. *Kor-tényező és egyenértékű pórusméretek.* Szintén megfelelő összefüggés ($R^2 \geq 0{,}75$-$0{,}97$) mutatkozik a kor-tényező és az egyenértékű pórusméretek között. Minél nagyobb az egyenértékű pórushossz, illetve minél kisebb az egyenértékű pórusátmérő, annál kedvezőbb az adott cementfajta kor-tényezője. Minél inkább meghaladja 90 napos korban a hossz/átmérő arány az 10^{23} nagyságrendet (1 m^3 cementkőre vetítve), annál kedvezőbb a várható kor-tényező. Már a mindössze 90 napos egyenértékű pórusméretek ismerete is nagy segítséget jelent a kor-tényező becsléséhez adott cementtípus esetében. Például, ha a CEM I (A) típusú cementhez 20% kohósalakot adunk (főbb fizikai és kémiai jellemzőiket lásd az *1. táblázatban*) és 90 napos korban az egyenértékű pórusátmérőre $Ø_{eqv,90nap}$= 14 nm-t, a pórushosszra pedig $L_{eqv,90nap}=13\times10^8$ m/cm^3-t kapunk, akkor a várható pórusátmérő 3 éves korban $Ø_{eqv,3év}$ ~12 nm, a pórushossz pedig $L_{eqv,3év} \sim 17.5\times10^8$ m/cm^3 (lásd a sárga szaggatott vonalakat a *17-18. ábrán*). Ezekből a 3 éves egyenértékű pórusméretekből becsülhető kor-tényező a *15-16. ábrák* szerint $\alpha \leq 0{,}3$. Más típusú kiegészítőanyagok (például 7% MK2+18% UFFA) esetében, ahol a 90 napos és 3 éves pórusátmérő rendre $Ø_{eqv}$=12 és 8 nm, a pórushossz pedig rendre $L_{eqv}=22\times10^8$ m/cm^3 és 44×10^8 m/cm^3 (lásd a lila szaggatott vonalakat a *17-18. ábrán*); várható, hogy a kor-tényező az előbbinél sokkal kedvezőbb értékű lesz (a *15-16.* ábra szerint α = 0,63-0,7). Ez a kor-tényezők közötti jelentős különbség már megmutatkozik a 90 napos korban mért egyenértékű pórusméretek arányában is (MK2+UFFA: $L_{eqv,90}/Ø_{eqv,90}$ = = 1.83×10^{23}, GGBS: $L_{eqv,90}/Ø_{eqv,90} = 0{,}93\times10^{23}$).

3. *Kloridállóság és a kötőanyag reakcióképes kémiai összetevői.* A kötőanyagok kémiai összetétele kulcsfontosságú paraméter, amely meghatározhatja a kloridállósági jellemzőket. Jó korreláció ($R^2 \approx 0{,}9$) állapítható meg a kötőanyagok kémiai összetevői és az akár mindössze 90 napos korban mért kloridmigrációs együttható között. *Minél nagyobb a ($SiO_{2,reaktív}$+Al_2O_3) tartalom, általában annál kedvezőbb a kor-tényező.* Ha a kötőanyag reakcióképes összetevőinek aránya például ($SiO_{2,reaktív}$+Al_2O_3) = 29.6% (20% granulált kohósalak) és például 34,4% (7% MK2+18% UFFA), továbbá $CaO_{reactive}$ = 57,0%, illetve rendre 46,7%, akkor a víz-kötőanyag tényező *v/k* = 0,4 értéke esetén a 3 éves kloridmigrációs együtthatóra rendre $D_{RCM,3\ év} \approx 1{,}5\times10^{-12}$ m²/s és $0{,}3\times10^{-12}$ m²/s, míg a kor-tényezőre rendre $\alpha = 0{,}33$ és 0,68 várható (lásd *19-20, ábra*). *A kötőanyag reakcióképes kémiai összetevőinek ismerete azért nagy jelentőségű, mert porozimetriai vagy kloridmigrációs mérések nélkül is (például már a cementgyártás során) jól becsülhetővé válik mind a kloridmigrációs együttható (90 napos kortól 3 éves korig), mind pedig a kor-tényező.*

4. *100 év vagy akár több száz év tervezési élettartam is becsülhető* némely 2- vagy 3-összetevős kötőanyag és a víz/kötőanyag tényező *v/k* = 0,4 esetére, még kis betonfedés és erős kloridtámadás (XD3) mellett is. A kis betonfedés jelentése, például:

   - az EN 206-100 DRAFT 14 alapján (lásd a *3. ábrát*) a tervezési élettartam DSL = 100 év és XD3 környezeti hatásosztály esetén a betonfedés megengedett legkisebb értéke c_{min} = 40 mm. A szabványtervezet szerint ez a kis betonfedés akkor engedélyezett, ha a kor-tényező eléri az $\alpha = 0{,}6$ értéket és a kezdeti kloridmigrációs együttható nem haladja meg a $D_{RCM}t_{(0)} \leq 4\times10^{-12}$ m²/s értéket (lásd *3. ábra*). Ha a kor-tényező kedvezőbb (0,6-nál nagyobb), akkor a szerzők javaslata alapján a kezdeti kloridmigrációs együttható nagyobb (kedvezőtlenebb) értéke is megengedhető. Például a kor-tényező $\alpha = 0{,}9$ esetére megengedhető a kezdeti kloridmigrációs együttható $D_{RCM}t_{(0)} \leq 11\times10^{-12}$ m²/s értéke (lásd *7. ábra*).
   - *Fick* II. módosított törvénye és a *fib* Bulletin 76 alapján számolva, egyes kötőanyag-társítások alkalmazásával 500 év tervezési élettartam és XD3 környezeti hatásosztály esetére is megfelelő a betonfedés c_{min} = 30 mm értéke. A vizsgált kötőanyag-társítások közül hat összetétel tűnik erre alkalmasnak (lásd a dőlt betűs kötőanyagokat a *4. ábrán*).

5. *Nem állapítható meg összefüggés a kezdeti kloridmigrációs együttható és az XRDS osztályok vagy a kor-tényező között.* Mérhetünk mind kedvezően kis, mind pedig kedvezőtlenül nagy kezdeti értéket a kloridmigrációs együtthatóra (például $D_{RCM}t_{(0)} = 1{,}3\times10^{-12}$ m²/s vagy $14{,}4\times10^{-12}$ m²/s); ettől függetlenül ezek mindegyike teljesítheti az XRDS 0,5 osztály követelményét,

ha a kor-tényező eléri rendre az $\alpha = 0{,}6$, illetve 0,9 értéket (lásd *1. és 7. ábrát*). Az *1. ábrán* látható az XRDS 0,5 osztályhoz tartozó kloridmigrációs együttható 50 éves korban elérendő követelménye ($D_{RCM,50\ év} \leq 0{,}05 \times 10^{-12}$ m^2/s), amely teljesülhet mind az említett kis, mind pedig a nagy kezdeti kloridmigrációs együttható esetén (lásd *1. és 7. ábra*).

Vizsgálataink szerint a kezdeti kloridmigrációs együttható $D_{RCM}t_{(0)}$=1,5×10^{-12} m^2/s és 15×10^{-12} m^2/s közötti teljes tartományában felvehet a kor-tényező mind $\alpha = 0{,}15$ (tehát igen kedvezőtlen) mind pedig 0,95 (tehát igen kedvező) értéket is (lásd *1. és 7. ábra*).

6. *Nincs összefüggés a teljes MIP pórustérfogat és a D_{RCM} vagy a kor-tényező értékei között (lásd 8. ábra).*

A kor-tényező pontosabb becsléséhez és a fizikai-kémiai törvényszerűségek jobb megértéséhez a cementkő mezo- és mikrostruktúrájának további kutatása szükséges a különböző kötőanyag-társítások fizikai-kémiai tulajdonságainak, a kloridmigráció, a karbonátosodás, a porozimetriai jellemzők, cement hidratáció, fázisösszetétel és morfológia vizsgálatával.

Az épített környezettel kapcsolatos szabványosítási folyamatok egyik fő célja a fenntarthatóbb körforgásos gazdaságra való átállás elősegítése. Az új cementtípusokkal készülő vasbetonszerkezetek – kisebb CO_2 kibocsátást eredményező – fenntarthatósági szempontjai esetenként figyelmen kívül hagyják a nemzetközileg elfogadott, fizikai törvényszerűségeken alapuló, időfüggő anyagtani modelleket. A fenntarthatóságra összpontosítva ezért indokolt, hogy a környezetvédelmi forgatókönyvek közül inkább a „bölcsőtől a sírig" forgatókönyvet részesítsék előnyben a piaci szereplők és a jogi szabályozások, semmint a „bölcsőtől a kapuig" változatot.

Amennyiben ilyen megközelítéssel készülnek új cement- és betonszabványok, akkor a jövőben ezek elősegíthetik az építőiparban esetenként már felmerülő tartóssági kérdések megoldását: „*New cement types might cause premature reinforcement corrosion.*", azaz „*Az új cementtípusok a vasalás idő előtti korrózióját okozhatják.*" (*Hunkeler*, 2023).

Annak érdekében, hogy elkerüljük a kloridtámadásnak kitett vasbetonszerkezeteink csökkenő használati élettartamát és a növekvő javítási költségeket, az *egyik lehetőség, hogy a cementszabványban meghatározzuk a kötőanyag reakcióképes kémiai összetevőit.*

A másik lehetőség: „*One obvious way forward to a more sustainable industry could be that the cement standard declared the cements durability potential by testing the cement in reference mixes according to EN 12390-10 and 11, in parallel to what they today do for strength testing.*", azaz „*A fenntarthatóbb ipar felé vezető nyilvánvaló út az lehetne, hogy a cementszabvány*

a szilárdságvizsgálatokkal párhuzamosan referenciakeverékeken igazolja a cementekben rejlő potenciális tartóssági lehetőséget is az EN 12390-10 és -11 szabvány szerinti vizsgálatokkal." (*Helland*, 2022) Megjegyzés: ez utóbbi szabványok a karbonátosodás és a kloriddiffúzió vizsgálati módszerei

Szabványhabarcsokon végzett vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy jó/kiváló kor-tényező érhető el a tiszta portlandcement és megfelelő kiegészítőanyag(ok) társításával, így számos lehetőség adódik a cement- és betonipar karbonlábnyomának műszakilag is megfelelő csökkentésére, vagyis a jó kloridállóság + kis betonfedés + alacsony karbonlábnyom kérdés megoldására. *A kötőanyag mérnöki megválasztásával*, a jégolvasztó sózásnak vagy tengervíznek kitett vasbetonszerkezetek gondos készítésével és utókezelésével már kis betonfedéssel és a víz-kötőanyag tényező szokásos, x = 0,40 értékével is gazdaságosan, mérnökileg tervezhető módon *elérhető az akár több évszázadnyi használati élettartam.*

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 számú, „Kémiai korrózióval, tűzzel vagy fagyasztással szemben fokozottan ellenálló betontermékek fejlesztése" című magyar kutatási támogatásért.

Hivatkozások

2013/179/EU Commission Recommendation, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A32013H017911

Balázs Gy. (1987): Építőanyagok és kémia, BME Egyetemi tankönyv

CEN/TC 250/SC 2 (2023) Eurocode 2: Design of concrete structures EN 206_100 DRAFT 14 v231106

CEN/TC 250 (2013): CEN/TC 250 - N 993, Response to Mandate M/515, 'Towards a second generation of EN Eurocodes', http://www.psc.ro/wp-content/uploads/2013/07/M515_TC-250-answerAnnexes.pdf

Collins et al. (2000) Effect of pore size distribution https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884600003276 Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 9, September 2000, Pages 1401-1406, https://doi.org/10,1016/S0008-8846(00)00327-6

fib Bulletin 34 (2006) „Model Code for Service Life Design", ***fib*** Lausanne, printed by Sprint-Digital-Druck, Stuttgart, 110 p., ISBN 2-88394-074-6

fib (2013), "Model Code for Concrete Structures 2010", Ernst and Sohn, Wiley, ISBN 978-3-433-03061-5

fib Bulletin 76 (2015), „Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides – State-of-the-art report", *fib* Lausanne, printed by DCC Document Competence Center Siegmar Kästl e.K., Germany, 189 p., ISBN 978-2-88394-116-8

Greve-Dierfeld, S. and Gehlen, C. (2014): Benchmark for deemed-to-satisfy rules (XD, XS) for *fib*-Congress, February 2014, Conference: fib Congress Mumbai 2014 https://www.researchgate.net/publication/311927033_BENCHMARK_FOR_DEEMED-TO-SATISFY_RULES_XD_XS_FOR_fib-CONGRESS_February_2014

Greve-Dierfeld et al. (2020) Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. Materials and Structures 53:136. https://doi.org/10,1617/s11527-020-01558-w

Helland, S. (2016): PERFORMANCE-BASED SERVICE LIFE DESIGN IN THE 2021 VERSION OF THE EUROPEAN CONCRETE STANDARDS – AMBITIONS AND CHALLENGES, November 2016, Conference: *fib* Symposium Cape Town, November 2016, Volume: PERFORMANCE-BASED APPROACHES FOR CONCRETE STRUCTURES - Proceedings ISBN 978-2-88394-121-2; https://www.researchgate.net/publication/311442176_performance-based_service_life_design_in_the_2021_version_of_the_european_concrete_standards

Helland S. (2022), THE IMPLEMENTATION OF A PERFORMANCE AND PROBABILISTIC BASED DURABILITY CONCEPT IN REVISED EUROPEAN CONCRETE, Conference Paper fib Congress Oslo 2022, https://www.fib-international.org/publications/fib-proceedings/6th-i-fib-i-international-congress-in-oslo,-norway-2022-proceedings-em-pdf-em-detail.html

Hunkeler F (2023), Performance based concrete design: Actual and future situation in Switzerland, with a focus on carbonation http://www.fib.bme.hu/2023-10-12%20Swiss/Performance%20based%20concrete%20design_Hunkeler_BME_12.10,2023_mod.pdf

Hunkeler F. et al. (2022) A NEW CONCRETE MIX DESIGN – PILOT APPLICATION FOR A ROAD BRIDGE PARAPET https://ingenieurberatung.ch/downloads/New%20concrete%20mix%20design%20for%20sustainable%20concretes_fib%20Congress_2022.pdf

Kopecskó, K. and Balázs Gy.L. (2017): Concrete with Improved Chloride Binding and Chloride Resistivity by Blended Cements, Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2017, Article ID 7940247, 13 pages, https://doi.org/10,1155/2017/7940247

Kopecskó, K., Horváth Sz., Kováts M., Mlinárik L., Must A., Somlai B., Zsovár Zs., Balázs L. Gy. (2020): A beton kémiai ellenálló képességének fokozása – áttekintés az NVKP_16-1-2016-0019 projekt altémájának feladatairól és eredményeiről, NVKP_16-1-2016-0019, „Fokozott ellenálló képességű beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése", projektzáró kiadvány, pp. 97-129. https://em.bme.hu/sites/default/files/page/NVKP_16-1-2016-0019%20%20projektz%C3%A1r%C3%B3%20kiadvány%20FINAL%20web%20HIRES.pdf

Kopecskó, K. and Mlinárik, L. (2022): The influence of different types of SCMs on microstructure and macroscopic properties of cementitious materials, J. Phys.: Conf. Ser. 2315 012019, https://iopscience.iop.org/article/10,1088/1742-6596/2315/1/012019 DOI 10,1088/1742-6596/2315/1/012019

Kopecskó, K. et al. (2022): Használati élettartam becslési lehetősége kloridionok behatolása esetén, Vasbetonépítés 2022/3, pp. 71–84, https://doi.org/10,32969/VB.2022.3.2

Laczkó L. et al. (2022): Effect of water/cement ratio on cement hydration, Építőanyag-Journal of Silicate Based and Composite Materials, Vol. 74, No. 4 (2022), 156–162. p. https://doi.org/10,14382/epitoanyag-jsbcm.2022.24

Leemann et al. (2017) Steady-state O_2 and CO_2 diffusion in carbonated mortars produced with blended cements. Materials and Structures 50:247. https://doi.org/10,1617/s11527-017-1118-3

Leivestad, S. (convenor) (2014a): JWG Durability JWG 250/104 - N25 http://www.expertcentre.dk/media/24477/bilag_2_n26_-_jwg_presentation_-_tc104_sc1_-_tc250_sc2_-_march_2014.pdf;

Leivestad, S. (convenor) (2014b): JWG – Durability, TC104/SC1-TC250/SC2 N26, Exposure resistance classes – draft for proposal on a new system to specify durability in EN 206 and EN 1992, technical background documentation. Report to CEN TC 104/SC1 Vienna March 2014; Report to CEN TC 250/SC2 Ispra March 2014, http://www.expertcentre.dk/media/24474/bilag_1_n25-jwg_report_to_tc104_sc1__tc250_sc2_-_2014_draft.pdf,

Müller C. (2019), DURAFOR - Forecast of durarability properties of concrete with new clinker based cements, https://www.vdz-online.de/en/knowledge-base/research-projects/durafor-forecast-of-durability-properties-of-concrete-with-new-clinker-based-cements

Nehdi et al. (2007) Using concrete admixtures for sulphuric acid resistance. January 2007 Construction Materials https://www.researchgate.net/publication/242418868160(1):25-35 DOI:10,1680/coma.2007.160,1.25

Novák, D., Novák, E.: Slagstar 42,5N, „Speciális cementfajta az agresszív kémiai korrózió ellen, Vasbetonépítés 2009/3, pp. 92–96. (in English: Special type of cement against aggressive chemical corrosion) http://fib.bme.hu/folyoirat/vb/vb2009_3.pdf

Spranitz et al. 2023, Cementtípusok, kiegészítőanyagok és folyósítószerek hatása a cementpépek reológiai-tulajdonságaira-2/1 (10-12 p.) https://www.betonujsag.hu/lapszamok/cikk/2611/cementtipusok-kiegeszitoanyagok-es-folyositoszerek-hatasa-a-cementpepek-reologiai-tulajdonsagaira-2/1-resz

Ujhelyi, J. (2005): Betonismeretek, BME Egyetemi tankönyv

Zaid A. A. Khaiqani – Kopecskó, K. (2021): The effect of supplementary cementitious materials on transport properties of cementitious materials – state-of-the-art. https://doi.org/10,32970/CS.2021.1.4